

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2010

Jan Vogl

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Měření vlastností optických přijímačů
Measurement of Optical Receivers
Characteristics

2010

Jan Vogl

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Vogl

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Měření vlastností optických přijímačů
Measurement of Optical Receiver Characteristics

Zásady pro vypracování:

1. Popište základní charakteristiky optických přijímačů.
2. Realizujte měřicí sestavu pro měření spektrální citlivosti optických přijímačů a proveďte měření vybraných typů přijímačů.
3. Srovnajte dosažené výsledky s katalogovými údaji měřených přijímačů.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. 5. 2010

.....

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za odborné vedení při zpracování práce a za jeho pomoc a podporu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou spojenou s optickým přijímačem. Hlavní náplní je popsání základních principů a vlastností přijímačů, které se používají v telekomunikační technice na optických vláknových spojích. Dále pak pro vybrané typy optických přijímačů realizovat měření jedné z jejich základních charakteristik, a to charakteristiku směrovou. Dosažené výsledky zjištěné měřením uceleně zpracovat a vhodně vyhodnotit.

Klíčová slova

Fotodetektor, fotoelektrický jev, elektron – děrový pár, směrová charakteristika

Abstract

This thesis deals with problems associated with the optical receiver. The main task is to describe the basic principles and characteristics of receivers used in telecommunication technology for optical fiber connections. Furthermore, for selected types of optical receivers we aim to realize measurement of one of their principal characteristics, which is the directional characteristic. Then, the results recorded by measuring are processed coherently and appropriately evaluated.

Key words

Photo detector, photoelectric effect, electron-hole pair, directional characteristics

Obsah

1	ÚVOD	7
2	FOTODETEKTORY	8
2.1	Základní principy	8
2.1.1	Vnější fotoefekt	8
2.1.2	Vnitřní fotoefekt	9
2.2	Používané materiály	10
2.3	Režimy fotodiod	11
2.3.1	Fotovoltaický režim	11
2.3.2	Fotovodivostní režim	11
2.4	Fotorezistory	12
2.5	Fotodioda $p - n$	13
2.6	Fotodioda $p - i - n$	15
2.7	Lavinová fotodioda APD	15
2.8	MSN fotodetektor	17
2.9	Základní parametry fotodetektorů	18
2.9.1	Kvantová účinnost	18
2.9.2	Citlivost	18
2.9.3	Temný proud	19
2.9.4	Šumový ekvivalentní výkon NEP	19
2.9.5	Linearita	20
2.9.6	Šířka pásma	20
2.9.7	Doba odezvy	21
2.9.8	Aktivní oblast	21
3	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	22
3.1	Použité měřicí přístroje	23
3.2	Popis měření	25
3.3	Výsledky měření	28
4	ZÁVĚR	31
	LITERATURA	32
	PŘÍLOHA	33

1 Úvod

Prudký rozmach Internetu silně ovlivnil a pozměnil tvář dnešní společnosti. Tato informační revoluce do jisté míry vděčí za svůj vznik rozvoji globálních optických komunikačních sítí, které umožňují vysokorychlostní přenos informací na velké vzdálenosti, bez nutnosti přenášeny signál na trase zesilovat (např. mezi kontinenty). Základním kamenem těchto sítí jsou optická vlákna, jimiž se šíří signál v podobě laserových optických pulzů na vlnových délkách v blízké infračervené oblasti, kde vlákna vykazují minimální útlum a disperzi. Tato technologie přenosu dat se používá nejen v páteřních sítích, ale v poslední době se čím dál víc prosazuje i jako poslední článek mezi koncovým uživatelem a spojovací sítí (přístupová síť). Díky větší flexibilitě, nižší hmotnosti a vyšší odolnosti vůči korozivním vlivům v porovnání se standardními elektrometalickými systémy se optická vlákna rozšířila také do průmyslu, zejména pak do oblasti senzorů.

Většina moderní komunikační a vláknové techniky pracuje v blízké infračervené oblasti spektra, konkrétně na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. V okolí těchto vlnových délek vykazuje světlo minimální útlum v běžně používaných křemenných vláknech. Pro vlnovou délku 1310 nm je i materiálová disperze křemenného vlákna minimální, což umožňuje spolu s dalšími technologiemi provozovat komunikační linky s běžnými přenosovými rychlostmi řádu 10 až 100Gb/s. Byla překonána i hranice jednoho terabitu za sekundu.

Tato bakalářská práce se věnuje jak popisu, tak i měření parametrů na posledním prvku optického přenosového kanálu optickém přijímači. Struktura práce je rozvržena do čtyř velkých kapitol. První kapitola obsahuje stručný úvod do problematiky optických komunikačních tras a rozvržení bakalářské práce. Druhá část je věnována teoretickému základu o optickém přijímači. Jsou zde uvedeny používané principy detekování světla, materiály využívané pro výrobu jednotlivých detektorů, dále pak nepoužívanější typy fotodetektorů se stručně popsaným principem, a také popis základních parametrů těchto součástek. Třetí kapitola se zaměřuje na popsání vlastního laboratorního měření jedné ze základních charakteristik optického přijímače. U několika vybraných přijímačů byla změřena jejich směrová charakteristika, která udává, jak se mění výstupní napětí se změnou úhlu dopadajícího fotonového svazku. Poslední čtvrtá část obsahuje zhodnocení celé práce a především zjištěné výsledky měření.

2 Fotodetektory

Fotodetektory a přijímače jsou velmi důležitou součástí optických přenosových systémů a určují celkovou výkonnost a účinnost systému. Může být sebelépe navržená a realizována trasa, ale pokud do ní zakomponujeme špatný fotodetektor, pak celý návrh ztrácí svůj původní záměr. Optický signál je stále ještě nutné v přijímači převést z optické roviny do roviny elektrické, v níž probíhá následné další zpracování jak analogové, tak digitální. Z toho tedy plyne, že základní úlohou fotodetektoru je přeměna dopadajícího světla na elektrický proud.

2.1 Základní principy [1]

Obvykle se používají následující základní fotodetektory

- **Tepelné detektory** – jejich princip je založen na přeměně energie fotonu na teplo. Tyto detektory se ovšem ve fotonice nevyužívají a to díky tomu, že jsou málo efektivní a pomalé (změna teploty).
- **Fotoelektrické detektory** – tento druh detektoru je ve fotonice nejpoužívanější. Jejich princip je založen na fotoefektu. Fotoefekt je jev, při kterém jsou elektrony emitovány z určité látky v důsledku absorpce elektromagnetickým zářením. Vznikají tedy volné nosiče náboje, které se díky vnějšímu elektrickému poli pohybují a vytvářejí tak měřitelný elektrický proud [4].

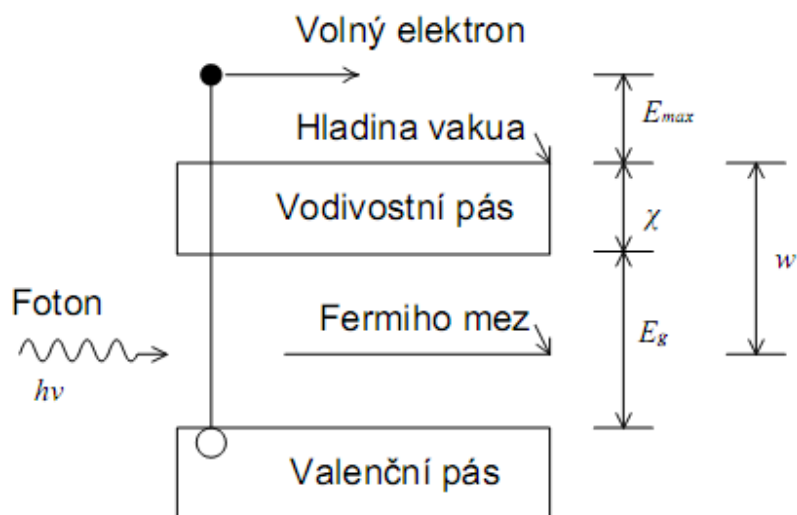
Na základě toho, jestli fotoelektrický jev probíhá uvnitř materiálu nebo na jeho povrchu, jej rozdělujeme na:

2.1.1 Vnější fotoefekt

Jestliže je energie dopadajícího fotonového toku na povrch látky ve vakuu dostatečně velká, může se emitovaný elektron dostat přes potenciálovou bariéru na povrchu látky do vakua jako volný elektron. Kinetická energie potřebná pro vyvážení elektronu do vakua v polovodiči je dána vztahem (1.1).

$$E_{max} = h\nu - (E_g + \chi) \quad (1.1)$$

kde $h\nu$ je energie dopadajícího fotonu, E_g je šířka zakázaného pásu a χ energetický rozdíl mezi hladinou vakua a dnem vodivostního pásu. Na obrázku 2.1 je vidět schematické znázornění



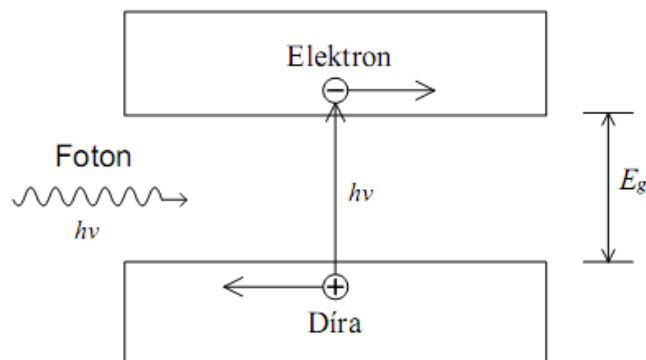
Obrázek 2.1: Vnější fotoefekt v polovodiči.

vnějšího fotoefektu. Zařízení, která tohoto principu využívají, se nazývají vakuové fotonky. Ty sice splňují část kritéria pro nasazení v oblasti komunikací, ale jsou příliš objemné a pracují také s příliš velkým závěrným napětím. Kvůli těmto příčinám se dnes výhradně využívá vnitřního fotoefektu a velmi malých polovodičových diod.

2.1.2 Vnitřní fotoefekt

Většina dnešních detektorů pracuje na základě vnitřního fotoefektu, při kterém nosiče (elektron a díra) zůstávají uvnitř vzorku. Absorpce fotonu v polovodiči má za následek generování volného elektronu, excitovaného z valenčního do vodivostního pásu, čímž dojde ke zvýšení vodivosti materiálu (viz Obrázek č. 2.2). Současně je generována díra ve valenčním pásu. Přiložení elektrického pole na materiál vede k pohybu elektronů i děr materiálem a k následnému vzniku elektrického proudu v elektrickém obvodu detektoru. Nejznámější součástí, používající tohoto principu, je fotodioda.

U některých detektorů se využívá vnitřní zesilovací mechanismus, který díky fyzikálním procesům, zesílí fotoelektrický proud a umožní tak snadnější detekování signálu. Prvky, ve kterých se uplatňuje tento proces vnitřního zesílení, jsou známé jako lavinové diody (ADP – avalanche photodiodes).



Obrázek č. 2.2: Fotogenerování elektron-děrového páru v polovodiči.

2.2 Používané materiály [2]

Nejvýznamnějšími prvky pro výrobu polovodičů, které se používají nejen v optoelektronice, ale i v elektronice, jsou křemík (Si) a germanium (Ge). V současnosti je většina komerčních elektronických prvků a integrovaných obvodů připravována z křemíku (Si). Nicméně, oba materiály jsou široce využívány pro přípravu detektorů fotonů. Nejpoužívanější sloučeniny pro výrobu polovodiče využitého ve fotodetektorech můžete vidět v tabulce č. 1. Je zde zaznamenána šířka zakázaného pásu E_g , dále tzv. odpovídající vlnová délka λ_g , což je vlnová délka fotonu o energii E_g ve vakuu a typ zakázaného pásu (I = nepřímý, D = přímý).

Materiál	Energie zakázaného pásu E_g [eV]	Odpovídající vlnová délka λ_g [μm]	Typ
Ge	0,66	1,88	I
Si	1,11	1,15	I
AlP	2,45	0,52	I
AlAs	2,16	0,57	I
AlSb	1,58	0,75	I
GaP	2,26	0,55	I
GaAs	1,42	0,87	D
GaSb	0,73	1,70	D
InP	1,35	0,92	D
InAs	0,36	3,5	D
InSb	0,17	7,3	D

Tabulka č. 1: Elementární a binární polovodiče.

Používané polovodičové materiály v detektorech se také liší podle toho, v jaké části elektromagnetického spektra pracují. Pro viditelnou oblast spektra (tedy kolem 800 nm) jsou to: Si, Ge, GaAs, InGaAs. Pro oblast blízkou infračervenému spektru ($1,3\mu\text{m} - 1,6\mu\text{m}$) se používá: Ge, GaAs, InGaAs, InGaAsP.

2.3 Režimy fotodiod [2]

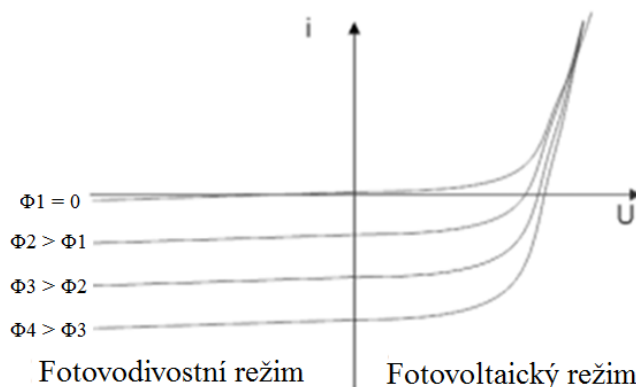
Jednou z nejvýznamnějších charakteristik fotodiod je Volt-Ampérova charakteristika, která nám udává pracovní oblasti diody (viz Obrázek č. 2.3). Pro detekci světla jsou využívány pouze dva kvadranty této charakteristiky a to třetí a čtvrtý kvadrant.

2.3.1 Fotovoltaický režim

Fotovoltaický režim, známý ze solárních panelů, je charakteristický tím, že dioda pracuje ve IV. kvadrantu Volt-Ampérové charakteristiky (nelineární oblast). Je to „pasivní“ režim, kdy dioda nepotřebuje k detekci závěrné napětí. Pro tento režim je charakteristické, že má úzkou oblast prostorového náboje, malé vnitřní pole a fotony, které jsou absorbovány mimo vyprázdněnou oblast, přinášejí další problémy (velká kapacita přechodu, malá doba odezvy). Prakticky lze toto zapojení použít jen pro malé optické výkony a aplikace nevyžadující krátkou dobu odezvy. Z tohoto popisu je patrné, že v telekomunikační technice se tento režim vesměs nepoužívá.

2.3.2 Fotovodivostní režim

Dioda v tomto režimu pracuje ve III. kvadrantu Volt-Ampérové charakteristiky. Vyznačuje se přiložením napětí v závěrném směru a rozšířením ochuzené vrstvy. Rozšíření ochuzené vrstvy zvýší pravděpodobnost detekce dopadajících fotonů a současně sníží kapacitu $p - n$ přechodu a tím i dobu odezvy fotodiody. Pokud na fotodiodu nedopadá žádné záření, je generován pouze tzv. temný proud (viz kapitola 2.9.3). Po ozáření přechodu dochází ke generování nosičů a na výstupu fotodiody lze měřit elektrický proud prakticky lineárně úměrný dopadajícímu optickému výkonu v rozsahu několika řádů. Dnes je tento režim nejpoužívanější.

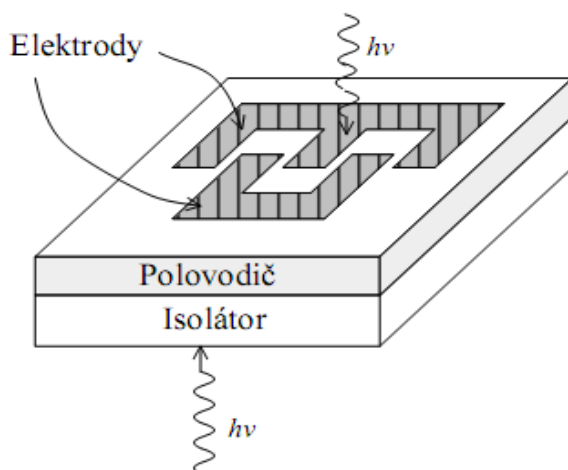


Obrázek 2.3: Volt-Ampérova charakteristika fotodiody (Φ – intenzita dopadajícího světla).

2.4 Fotorezistory [1]

Fotorezistorové detektory jsou založeny na vnitřním fotoelektrickém jevu a pracují tak, že zaznamenávají buď fotoelektrický proud úměrný fotonovému toku, nebo pokles napětí na zatěžovacím odporu zapojeném v sérii s detektorem. Pokud pracují na prvně zmíněném principu, pak čím více světla na fotorezistor dopadá, tím vzniká více volných elektronů a zvyšuje se elektrická vodivost a tím pádem se snižuje elektrický odpor. Polovodičový materiál má tvar destičky nebo tenké vrstvy. Přívodní kontakty, anoda i katoda, jsou často umístěny na stejném povrchu materiálu a mají hřebenovité uspořádání, aby byla osvětlena co největší plocha polovodiče. Jestliže má materiál podložky dostatečnou šířku zakázaného pásu, může světlo dopadat také ze spodní strany detekční struktury (viz Obrázek č. 2.4).

Fotorezistory vykazují rozdíl od fotodiod vnitřní zisk, který je, jednoduše řečeno, výsledkem rozdílných hodnot rekombinační a průletové doby. Předpokládejme, že se elektron pohybuje rychleji než díra a že doba rekombinace je velmi dlouhá. Jelikož elektrony a díry se přemísťují na opačné strany fotorezistoru, urazí elektron svou dráhu dříve než díra. Požadavek spojitosti proudu přinutí vnější obvod dodat okamžitě jiný elektron, vstupující do prvku z přívodu na levé straně. Nový elektron se pohybuje rychle doprava a opět urazí svou dráhu dříve, než se díra dostane na levou stranu čidla. Tento proces pokračuje tak dlouho, až elektron rekombinuje s dírou. Absorpce jednoho fotonu tak může vést k tomu, že elektron projde vnějším obvodem několikrát. Detektory na principu fotorezistorů, využívající mezipásmových přechodů, mohou na rozdíl od detektorů založených na vnější fotoemisi pracovat daleko do infračervené oblasti. Užití detektorů na vlnových délkách větších než asi $2\mu\text{m}$ ovšem vyžaduje chlazení čidla, aby se v těchto materiálech



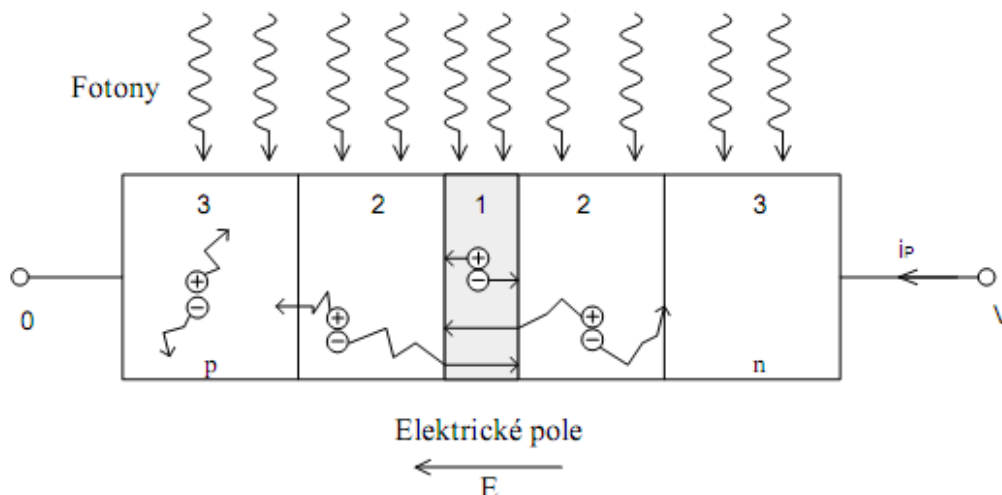
Obrázek č. 2.4: Struktura fotorezistoru.

s úzkým zakázaným pásem co nejvíce omezila tepelná excitace elektronů do vodivostního pásu. Mezi výhody této součástky pro detekování světla můžeme zahrnout značnou citlivost, snadné použití a nízkou cenu. Mezi nevýhody se uvádí dlouhá doba odezvy, velká teplotní závislost odporu.

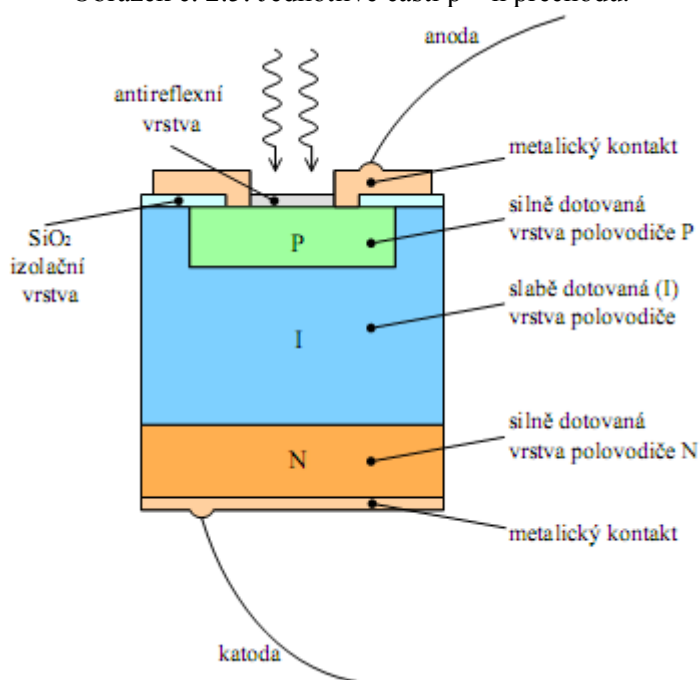
2.5 Fotodiody $p - n$ [5]

Stejně jako v případě fotorezistoru je i funkce fotodiody založena na vnitřním fotoelektrickém jevu. Fotodiody je tvořena přechodem $p - n$, jehož závěrný proud stoupá, když dochází k absorpci fotonů. Kdekoli na $p - n$ přechodu se absorbuje foton, je generován elektron-děrový pár. Ovšem pouze tam, kde existuje elektrické pole, mohou být volné nosiče náboje transportovány v určitém směru. Jelikož je elektrické pole v přechodu $p - n$ pouze v oblasti ochuzené vrstvy, je potřeba právě zde nosiče náboje generovat. V zásadě existují tři oblasti na $p - n$ přechodu, kde se elektron-děrové páry generují. Tyto oblasti jsou znázorněny na Obrázku č. 2.5.

- Elektrony a díry generované v ochuzené vrstvě (viz Obrázek č. 2.5 oblast 1) – tyto nosiče se pohybují působením elektrického pole rychle v opačných směrech. Jelikož elektrické pole míří vždy ve směru $n - p$, elektrony se pohybují na stranu kladné elektrody a díry na stranu záporné elektrody. Fotoproud ve vnějším obvodu tedy teče vždy v závěrném směru.
- Elektrony a díry generované daleko od ochuzené vrstvy (viz Obrázek č. 2.5 oblast 3) – nosiče v této oblasti se nepohybují, neboť zde není elektrické pole. Nepřispívají k proudu ve vnějším obvodu.



Obrázek č. 2.5: Jednotlivé části p – n přechodu.



Obrázek č. 2.6: Struktura fotodiody $p - i - n$.

- Elektron-děrové páry generované mimo ochuzenou vrstvu, ale v její blízkosti (viz Obrázek č. 2.5 oblast 2) – tyto nosiče se mohou do ochuzené vrstvy dostat náhodnou difuzí. Elektron přicházející z oblasti p je rychle přenesen přes přechod a přispívá tak nábojem do vnějšího obvodu. Díra přicházející z oblasti n působí podobně.

Fotodiody jsou nicméně rychlejší než fotorezistory, neboť silné elektrické pole v ochuzené oblasti dodává fotogenerovaným nosičům velkou rychlost. Navíc nejsou ovlivněny mnoha

záchytnými procesy, které se vyskytují ve fotorezistorech. Detektory, v nichž jsou použity fotodiody $p - n$, mají dostatečnou citlivost, která je spektrálně závislá. Ovšem pro tento typ fotodiody nejsou vhodné vysoké frekvence a nízká intenzita dopadajícího elektromagnetického záření. Mají dosti dlouhou dobu odezvy a docela značný temný proud. Používají se v průmyslových aplikacích a pro krátké komunikační linky.

2.6 Fotodioda $p - i - n$ [5, 3]

Fotodioda $p - i - n$ má jako detektor řadu předností oproti fotodiodě $p - n$. Dioda $p - i - n$ je tvořena přechodem $p - n$, který má vrstvu s vlastní vodivostí (obvykle slabě dotovanou), označovanou jako intrinsická oblast, uzavřenou mezi vrstvy p a n (viz Obrázek č. 2.6). Takováto struktura slouží k rozšíření oblasti s elektrickým polem, vlastně k rozšíření ochuzené vrstvy. Fotodiody s $p - i - n$ strukturou mají následující přednosti:

- Rozšíření ochuzené vrstvy součástky (ve které se generované nosiče pohybují) zvětšuje plochu, která slouží k zachytávání dopadajícího světla.
- Rozšíření ochuzené vrstvy redukuje kapacitu přechodu. Na druhé straně však roste průletová doba.

Dioda je konstruována tak, aby světlo dopadalo čelně na strukturu diody. Někdy se také využívá odrazu světla od zadní stěny diody, což zvyšuje její citlivost. Výhodou je široká absorpční oblast, malá kapacita přechodu. Proto je tato fotodioda využitelná pro vyšší přenosové rychlosti. Malé kapacity také odpovídá rychlý pohyb volných nosičů skrz strukturu diody.

2.7 Lavinová fotodioda APD [6]

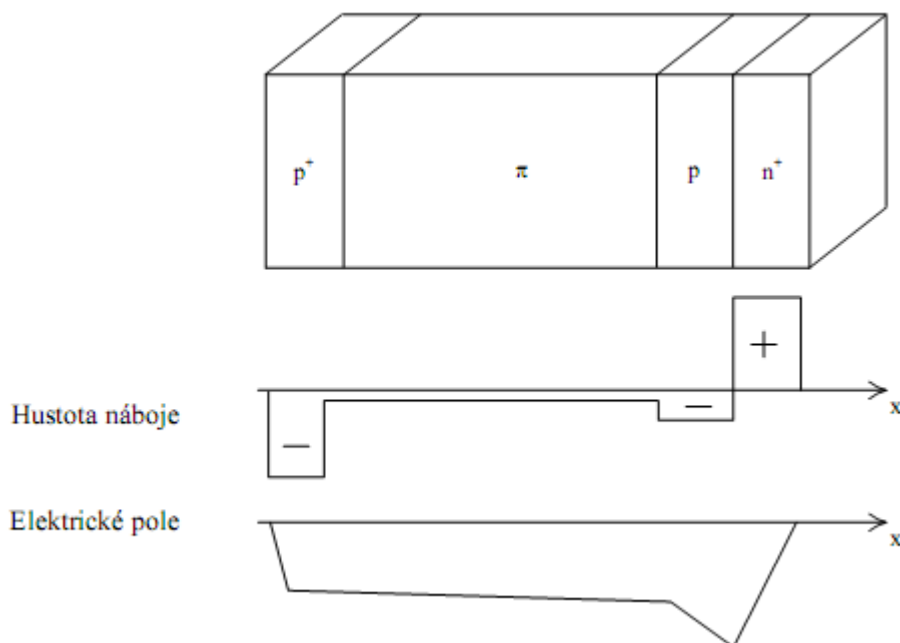
Lavinová dioda (APD – avalanche photodiode) přeměňuje každý detekovaný foton na kaskádu pohybujících se párů nosičů. Slabý světelný signál tak vytvoří dostatečný proud, který lze snadno zaznamenat elektronickým systémem následujícím za APD. Čidlo je tvořeno fotodiodou, na kterou je přiloženo vysoké závěrné napětí (řádově v rozpětí 20 – 100 V), takže v přechodu existuje silné elektrické pole. Nosiče náboje jsou urychlovány a získávají energii, postačující k excitaci nových nosičů nárazovou ionizací.

2. FOTODETEKTORY

V místě ochuzené vrstvy dojde k absorpci fotonu a vytvoření elektron – děrového páru (elektron ve vodivostním a díra ve valenčním pásu). Elektron je urychlován působením silného elektrického pole a zvyšuje tak svou energii vzhledem ke dnu vodivostního pásu. Urychlující proces je stále přerušován náhodnými srážkami s krystalickou mřížkou, při kterých ztrácí část získané energie. Má-li štěstí a získá-li někdy v průběhu tohoto procesu energii větší než E_g , může nárazovou ionizací generovat druhý elektron – děrový pár. Tyto dva elektrony jsou potom urychlovány opět elektrickým polem a každý z nich může způsobit další nárazovou ionizaci. Také generované díry jsou urychlovány a pohybují se ve směru doleva. Každá díra, která získá dostatečnou energii, může rovněž generovat nárazovou ionizací elektron – děrový pár. Schopnost elektronů a děr ionizovat nárazem se charakterizuje ionizačními koeficienty α_e a α_h . Tyto veličiny, představují pravděpodobnost ionizace na jednotkové délce dráhy.

Podobně jako je tomu v případě jakékoliv fotodiody, by mělo geometrické uspořádání APD zajistit maximální absorpci fotonů např. provedením ve tvaru $p-i-n$. Oblast, ve které dochází k násobení, by naopak měla být tenká, aby se co nejvíce omezila možnost vzniku lokalizovaných nekontrolovatelných lavin, které vznikají působením silného elektrického pole. Tyto dva protichůdné požadavky vyžadují takovou konstrukci APD, ve které je oblast absorpce oddělena od oblasti násobení. Fotony jsou absorbovány v široké oblasti s vlastní vodivostí, nebo jen slabě dotované. Fotoelektrony přes tuto oblast driftují vlivem slabého elektrického pole a nakonec vniknou do tenké vrstvy, v níž vlivem silného elektrického pole dochází k lavinovému násobení. Toho se dá dosáhnout v APD se strukturou $p^+ - \pi - p - n^+$, znázorněnou na obrázku č. 2.7. K absorpci fotonů dochází ve velmi široké oblasti π , což je velmi slabě dotovaná oblast p . Elektrony driftují oblastí π do tenkého přechodu $p - n^+$, kde na ně působí tak silné elektrické pole, že dojde k jejich lavinovému násobení. Závěrné napětí přiložené na součástku je tak velké, aby ochuzená oblast pronikla skrz oblast p a π až do kontaktní vrstvy p^+ .

Jak už bylo zmíněno výše, hlavní výhodou APD je velice vysoká citlivost. Z nevýhod můžeme uvést nutnost použití velmi vysokého závěrného napětí, dále se u APD projevuje více šumových složek než u obyčejné fotodiody a v neposlední řadě nelinearita výstupu vlivem lavinového jevu.



Obrázek č. 2.7: Fotodioda APD se strukturou $p^+ - \pi - p - n^+$.



Obrázek č. 2.8: Struktura MSN fotodetektoru.

2.8 MSN fotodetektor [2]

Jedná se o nový typ detektorů, které se dnes používají velmi zřídka, ale vzhledem ke své jednoduchosti je předpoklad, že se tento typ fotodetektoru prosadí. MSN fotodetektor využívá planární technologii výroby, která je technologicky velmi dobře zvládnutá z výroby integrovaných obvodů. Díky planární technologii výroby mají tyto detektory velmi malou kapacitu přechodu a tím velmi rychlou dobu odezvy. Jejich velkou nevýhodou je proti tomu nízká citlivost na vstupní výkon. Strukturu tohoto fotodetektoru můžeme vidět na obrázku 2.8.

2.9 Základní parametry fotodetektorů

Struktura vrstev $p-n$ či $p-i-n$, použitý materiál, velikost aktivní plochy a další konstrukční parametry určují detekční vlastnosti fotodiody. Jejich správná analýza a výběr vhodné fotodiody je nutnou podmínkou pro úspěšnou realizaci libovolného komunikačního protokolu.

2.9.1 Kvantová účinnost [1]

Kvantová účinnost η (quantum efficiency) fotodiody je definována poměrem počtu N_{el} nosičů proudu generovaných do obvodu a počtem fotonů N_{ph} dopadajících na aktivní plochu fotodiody,

$$\eta = \frac{N_{el}}{N_{ph}} = \frac{hc}{e\lambda} R \quad [\%] \quad (1.2)$$

kde h je Planckova konstanta, c je rychlost světla, e je velikost elementárního náboje, λ je vlnová délka dopadajícího záření a R je citlivost fotodetektoru. Celková kvantová účinnost fotodiody je určena součinem vnitřní (materiálové) kvantové účinnosti a kolekční účinnosti. Vnitřní kvantová účinnost dosahuje pro čisté polovodičové materiály vysokých hodnot. Kolekční účinnost zahrnuje ztráty průchodem záření bez vyvolání vnitřního fotoelektrického jevu, ztráty odrazem záření a další ztráty. Tato účinnost je dána návrhem fotodiody, především tloušťkou ochuzené vrstvy či nedopované I vrstvy a kvalitou antireflexních vrstev. Někdy se celková kvantová účinnost označuje jako vnější kvantová účinnost pro odlišení od účinnosti vnitřní. Celkovou kvantovou účinnost fotodiody lze zvýšit zlepšením kolekční účinnosti s využitím geometrie zachycující světlo. Záření odražené od aktivní plochy fotodiody lze zachytit optickými prvky a fokusovat zpět na aktivní plochu nebo detekovat dalšími fotodiodami. Pro aplikace vyžadující vysokou přenosovou rychlost není však tato geometrie vhodná s ohledem na efektivní prodloužení doby odezvy celého detektoru.

2.9.2 Citlivost [1]

Citlivost či senzitivita R (responsivity) fotodetektoru je definována poměrem generovaného fotoproudu I a dopadajícího optického výkonu P ,

$$R = \frac{I}{P} \left[\frac{A}{W} \right]. \quad (1.3)$$

Citlivost fotodiody závisí na vlnové délce dopadajícího záření a to různě pro různé použité materiály. Citlivost se může snižovat, jestliže na detektor dopadá příliš velký optický výkon. Je to způsobeno saturací detektoru, která omezuje lineární dynamický rozsah, ve kterém odezva

2. FOTODETEKTORY

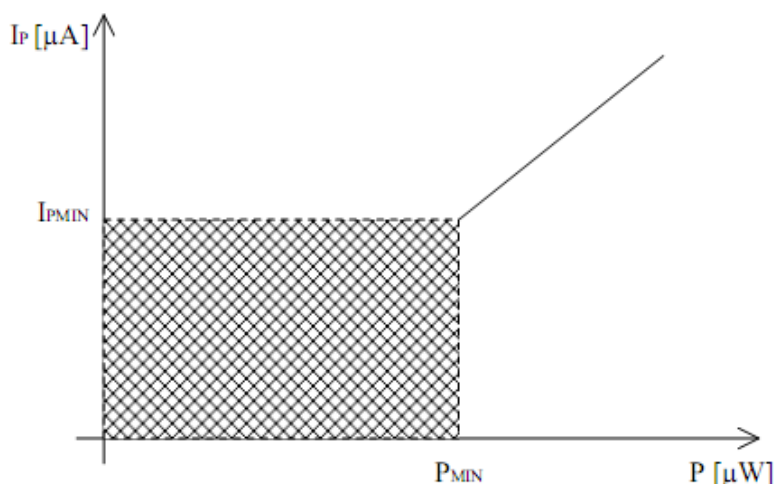
detektoru roste lineárně s optickým výkonem dopadajícího záření. Citlivost dále závisí přímo úměrně na tloušťce ochuzené vrstvy či nedopované I vrstvy a na kvalitě antireflexní úpravy povrchu. Pro používané polovodičové materiály s vysokým indexem lomu mohou být ztráty odrazem bez antireflexních vrstev značné, například 33% u InGaAs s indexem lomu přibližně 3,7. Výrobci obvykle uvádí maximální dosažitelnou citlivost a příslušnou vlnovou délku. Často bývá uváděn také rozsah vlnových délek, pro které citlivost klesá nejvýše na polovinu její maximální hodnoty. Pro úplnost dodejme, že někdy se místo pojmu citlivost používá jednoduchého výrazu odezva a pojem citlivost slouží k označení minimálního optického výkonu, pro který dosahuje celý optický přijímač (fotodioda, zesilovač, demodulace) požadovanou maximální hodnotu chybovosti (BER, bit error ratio).

2.9.3 Temný proud

Temný proud I_d (dark current) udává fotoproud generovaný diodou ve fotovodivostním režimu bez přítomnosti dopadajícího záření. Tento parametr je klíčový pro analýzu odstupu signálu od šumu (SNR), pokud je fotodioda použita jako detektor v optickém komunikačním schématu. Temný proud má povahu náhodné veličiny se spektrální hustotou blízkou bílému šumu. Hodnoty temného proudu závisí na materiálu fotodiody (InGaAs detektory vykazují menší temný proud než detektory Ge), její konstrukci a absolutní velikosti záporného předpětí. Signály ležící pod úrovní temného proudu jsou nerozlišitelné, a také temný proud určuje prahový optický výkon dopadající na fotodetektor. Jeho oblast je znázorněna na obrázku č. 2.9.

2.9.4 Šumový ekvivalentní výkon NEP [2]

NEP (Noise – Equivalent Power), je optický výkon vyvolávající při detekci fotodiodou elektrický proud srovnatelný s šumovým temným proudem v šířce pásma 1 Hz. Související detektivita je inverzní hodnotou NEP ($1/\text{NEP}$) a specifická detektivita představuje detektivitu vztahenou na jednotku plochy fotodiody. Pokud je fotodioda použita v optickém komunikačním schématu, souvisí tyto parametry s citlivostí optického přijímače, což je minimální použitý optický výkon nutný pro překonání dané úrovně chybovosti. Někteří výrobci a autoři definují NEP jako minimální detekovatelnou energii na druhou odmocninu šířky pásma (normovaný NEP). Při definování tímto způsobem, má normovaný NEP jednotku $\frac{W}{\sqrt{Hz}}$.



Obrázek č. 2.9: Oblast temného proudu.

2.9.5 Linearita

Linearita fotodetektoru zůstává zachována, pokud zvýšení dopadajícího optického výkonu vede ke zvýšení generovaného fotoproudu stejným faktorem. Pro nízké výkony řádu NEP je linearita porušena s ohledem na konstantní temný proud. Naopak pro vysoké průměrné optické výkony řádu desítek mW začíná docházet k saturaci a fotodetektor ztrácí lineární odezvu, především v případě krátkých pulzů. Jednou z příčin nelineární odezvy na vyšší dopadající špičkové výkony může být vícefotonová absorpce. Zvláště pro vlnové délky vyšší než λ_{max} odpovídající minimální energii pro překonání zakázaného pásu je pravděpodobnost absorpce fotonu velmi nízká a představuje pravděpodobnost současné absorpce dvou fotonů. V blízké infračervené oblasti nad 1, 2 μm lze tento jev pozorovat u křemíkových fotodiod, které mohou být využity jako dvoufotonové absorbéry například pro měření ultrakrátkých femtosekundových a pikosekundových pulzů.

2.9.6 Šířka pásma

Šířka pásma BW (bandwidth) fotodetektoru určuje oblast harmonických frekvencí, které jsou detekovány bez výrazného útlumu. Obvykle se uvažuje 3 dB šířka pásma představující maximální dovolený pokles přenosu na polovinu. Šířka pásma fotodiody je omezena jednak vnitřními vlivy, především rychlostí generovaných nosičů, a dále vnějšími elektrickými parametry a zapojením obvodu. Obecně se velké šířky pásma dosahuje pro fotodiody s malou aktivní plochou, širší ochuzenou oblastí či nedopovanou I vrstvou a pro absolutní hodnoty záporného přepětí. Menší výsledná kapacita C fotodiody potom vede k menší hodnotě časové konstanty τ , která je nepřímo úměrná šířce pásma. Elektrický odpor vstupní části obvodu bývá proto minimalizován nebo volen

nejvýše v řádu $100\ \Omega$. Nevýhodou minimalizace aktivní plochy fotodiody je snížení saturačního proudu. Vzniká tak nepřímá relace mezi dynamickým rozsahem a šířkou pásma.

2.9.7 Doba odezvy [1]

Doba odezvy je nepřímo úměrná šířce pásma. Pro vyšší detekované a přenášené harmonické frekvence lze lépe zachovat strmost náběžné hrany obdélníkového signálu případně délku generovaného elektrického pulzu ve srovnání s pulzem optickým. Dobu odezvy lze tedy definovat a měřit jako čas potřebný pro přechod fotodiody mezi dvěma stacionárními hodnotami fotoproudu pro dvě hodnoty dopadajícího optického výkonu změněné skokem, přesněji řečeno změněné rychle ve srovnání s dobou odezvy.

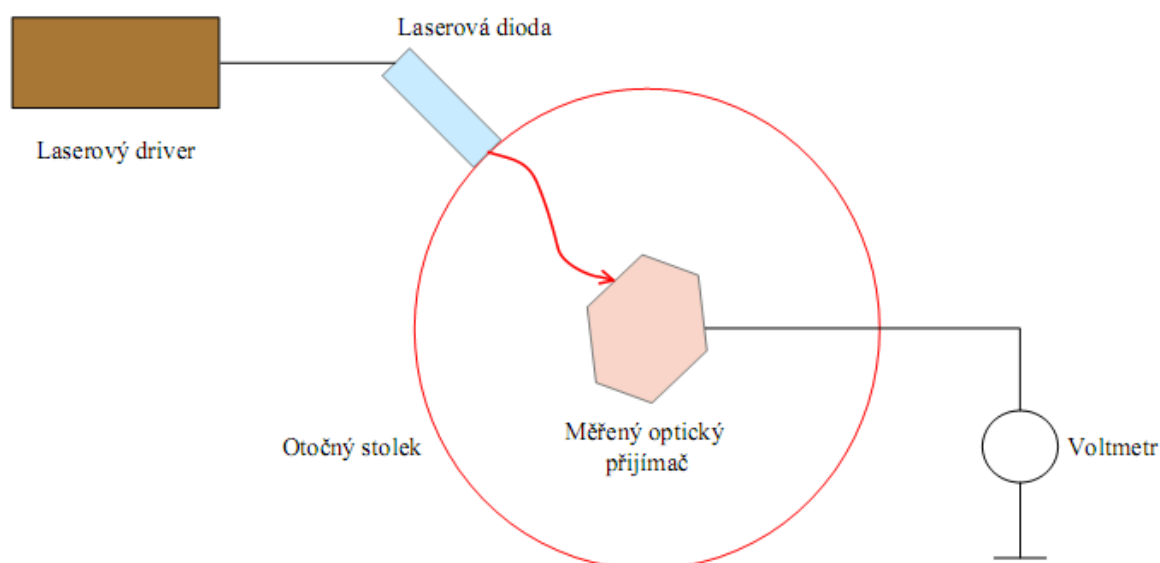
2.9.8 Aktivní oblast

Aktivní oblast čipu (Active chip area) udává velikost plochy, kterou je fotodioda schopna přijímat záření. Při volbě větší aktivní oblasti dosáhneme vyšší citlivosti přijímače, ale na úkor větší kapacity. V praxi se před aktivní oblast dávají různé druhy filtrů. Takto dosáhneme selekce přijímaného pásma před vstupem na přijímací diodu (zúžení spektrální charakteristiky), čímž se omezí vliv ostatních zdrojů záření mimo přijímané pásmo.

3 Experimentální měření

Součástí zadání bakalářské práce bylo také experimentální měření na optickém přijímači. Měření, které bylo realizováno, mělo za úkol zjistit, jak se mění úroveň výstupního signálu v závislosti na úhlu dopadajícího fotonového svazku. Charakteristiku, kterou dostaneme tímto měřením, nazýváme směrovou charakteristikou optického přijímače. Ze zjištěné charakteristiky poté snadno určíme, v jaké úhlové odchylce můžeme měřený optický přijímač provozovat tak, aby jeho kvantová účinnost byla co nejvyšší.

Toto experimentální měření bylo provedeno na třech různých typech optických přijímačů od společnosti THORLABS, jmenovitě DET 10 A/M; DET 10 C/M; PDA 36A – EC. Pro lepší názornost a porovnání byly proměřeny dva optické přijímače stejného typu (DET 10 A/M). Měřicí pracoviště jsme sestavili ve speciálně upravené laboratoři, kde nebyl přístup okolního světla. Okolní světlo by zkreslovalo detekci a došlo by k výrazné chybě měření. Na obrázku č. 3.1 je znázorněno blokové schéma mnou vytvořeného měřicího pracoviště.



Obrázek č. 3.1: Blokové schéma měřicího pracoviště.

3.1 Použité měřicí přístroje

Tato kapitola je věnována seznámení s přístroji, které byly použity během měření. Jedná se především o typy optických přijímačů, zdroj fotonového svazku a další přístroje.

THORLABS DET 10 A/M [7]



Obrázek č. 3.2: Optický přijímač DET 10 A/M.

Jedná se o příruční vysokorychlostní fotodetektor, jehož důležité parametry jsou zaznamenány v Tabulce č. 2:

Fotodioda	Aktivní oblast [mm ²]	Rozsah vlnové délky [nm]	NEP [W/√Hz]	Temný proud [nA]	Výstupní napětí [V]
PIN (Si)	0,8	200 – 1100	$1,9 \cdot 10^{-14}$	0,3	0 – 10

Tabulka č. 2: Parametry optického přijímače DET 10 A/M.

THORLABS DET 10 C/M [8]



Obrázek č. 3.3: Optický přijímač DET 10 C/M.

3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Jedná se o příruční vysokorychlostní fotodetektor, jehož důležité parametry jsou zaznamenány v Tabulce č. 3:

Fotodioda	Aktivní oblast [mm ²]	Rozsah vlnové délky [nm]	NEP [W/√Hz]	Temný proud [nA]	Výstupní napětí [V]
PIN (InGaAs)	0,8	700 – 1800	$2,45 \cdot 10^{-14}$	1	0 – 5

Tabulka č. 3: Parametry optického přijímače DET 10 C/M.

THORLABS DET 10 C/M [9]



Obrázek č. 3.4: Optický přijímač PDA 36A – EC

Jde o přijímač, který umožňuje nastavit vnitřní zisk. Pomocí otočného tlačítka je možno nastavit osm poloh s krokem 10 dB (0 – 70 dB). Tento přijímač oproti dvěma předcházejícím potřebuje napájení ze síťového adaptéru. Další parametry jsou uvedeny v Tabulce č. 4.

Fotodioda	Aktivní oblast [mm ²]	Rozsah vlnové délky [nm]	Max výstupní proud [mA]	Výstupní napětí [V]
PIN (Si)	13	350 – 1100	100	0 – 5 0 – 10

Tabulka č. 4: Parametry optického přijímače PDA 36 – EC.

3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Laserová dioda



Obrázek č. 3.5: (a) Laserová dioda. (b) Polarizační filtr.

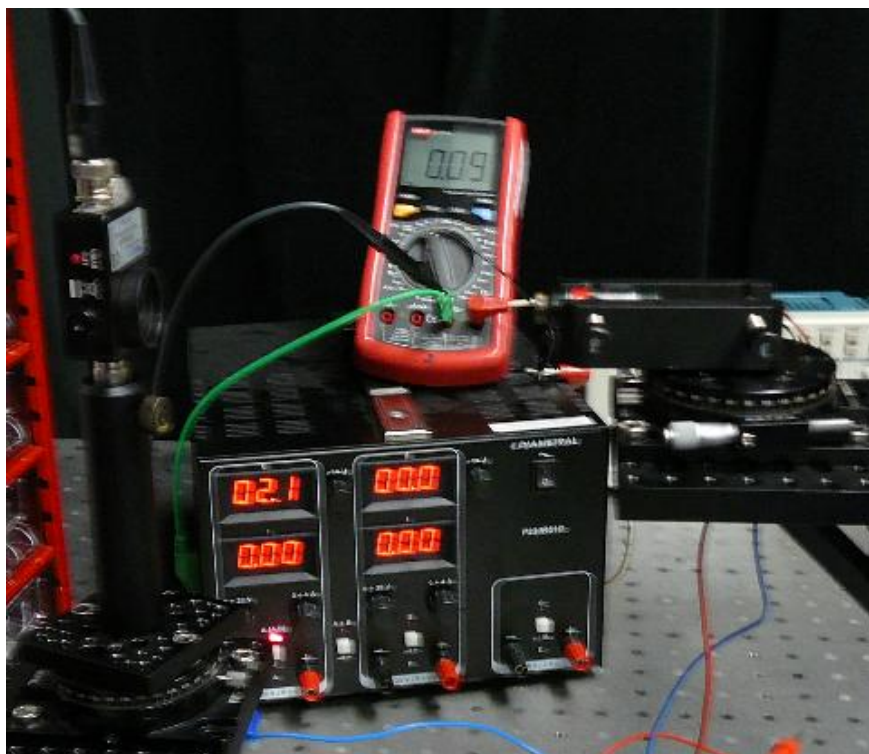
Slouží jako zdroj světla pracující na vlnové délce 650nm. Aby byl zajištěn po celou dobu měření konstantní optický výkon, je dioda připojena na napěťový zdroj, na kterém je nastaveno po celou dobu měření konstantní napětí.

Další přístroje využité při experimentálním měření byly:

- Zdroj napětí (Diametral P230R51D) – sloužil k napájení laserové diody.
- Digitální multimetr (UNI – T UT70A) – sloužil pro odečet výstupního napětí z optického přijímače.
- Polarizační filtry (THORLABS) – sloužily k útlumu fotonového svazku, aby na optickém přijímači nedocházelo k saturaci výstupního signálu (použito pouze u PDA 36A – EC).
Ukázku polarizačního filtru můžete vidět na obrázku č. 3.5 (b).

3.2 Popis měření

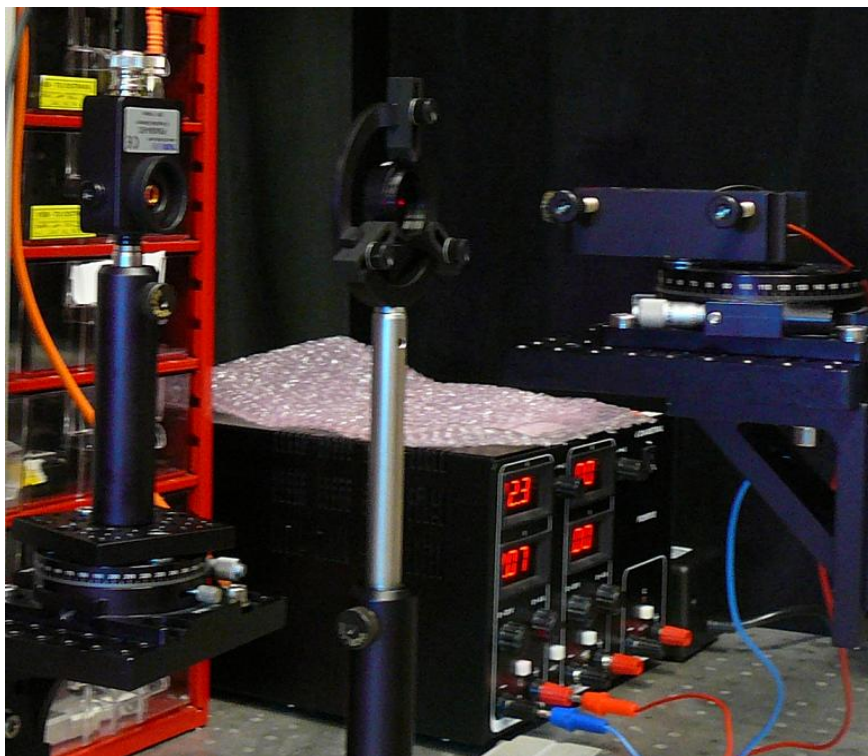
Základní blokové schéma pracoviště pro měření směrových charakteristik optických přijímačů je znázorněno na obrázku č. 3.1. Na obrázku č. 3.6 je znázorněn skutečný obrázek měřicího pracoviště pro detektory DET 10 A/M; DET 10 C/M. Základem měřicí sestavy je otočný stůl, v jehož ose otáčení je uchycen měřený optický přijímač tak, aby střed citlivé plochy fotodetektoru procházel osou otočného stolku. Na přijímač necháme dopadat světlo laserové diody, která je napájena z laboratorního zdroje. Ten nám zajišťuje, že proud procházející diodou bude konstantní, a tím bude konstantní i optický výkon laserové diody.



Obrázek č. 3.6: Skutečný obrázek měřicího pracoviště pro detektory DET 10 A/M; DET 10 C/M

Laserová dioda je uchycena v držáku, který je pevný a je umístěn mimo otočný stolek tak, aby směr laserového paprsku byl ve směru normály otočného stolku. Velikost výstupního napětí voltmetru na výstupu optického přijímače je pak ukazatelem velikosti dopadajícího optického výkonu. Natočením otočného stolku je měněn úhel, pod kterým světlo na optický přijímač dopadá a je možné vyhodnocovat směrovou charakteristiku jako závislost výstupního napětí na úhlu natočení při zajištěném konstantním výkonu laseru. Tento úhel α volíme od 0° (výchozí stav) do 90° s krokem 5° a to po směru hodinových ručiček i proti jejich směru. Pro každou polohu otočného stolku odečteme výstupní napětí. Kvůli omezení vlivu chyby měření jako je například špatné nastavení úhlu otočného stolku, špatné odečtení hodnoty z voltmetru a dalším okolním vlivům, měření opakujeme pro každý směr pět krát. Výsledné hodnoty výstupního napětí poté zprůměrujeme dle známého vztahu č. 1.4.

$$U_2 = \frac{U_{21} + U_{22} + U_{23} + U_{24} + U_{25}}{5} \text{ [V]} \quad (1.4)$$



Obrázek č. 3.7: Skutečný obrázek měřicího pracoviště pro detektor PDA 36A – EC

Abychom mohli vykreslit směrovou charakteristiku optického přijímače jako závislost výstupního napětí na úhlu dopadajícího záření, můžeme pro lepší názornost přepočítat výstupní napětí na procenta dle vztahu 1.5.

$$pom = \frac{U_2}{U_{REF}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.5)$$

Kde U_2 značí zprůměrované výstupní napětí a U_{REF} odpovídá referenčnímu napětí, tedy napětí, při nulovém úhlu natočení otočného stolku.

Při měření optického přijímače typu PDA 36A – EC, u kterého máme možnost nastavit vnitřní zisk, se vyskytl problém spočívající v tom, že při nastavení zisku většího než 0 dB a při konstantním optickém výkonu doházelo v přijímači k saturaci výstupního napětí, což mělo za následek nepřesné měření. Proto bylo nutné použít polarizační filtry, které dopadající optický výkon dostatečně utlumily a bylo tak možné provádět přesné měření. Skutečné měřicí pracoviště pro měření optického přijímače PDA 36A – EC je možné vidět na obrázku č. 3.7.

3.3 Výsledky měření

V této kapitole jsou uvedeny naměřené výsledky a jim odpovídající grafické výstupy pouze pro jeden optický přijímač. Ostatní výsledky jsou kvůli úspoře místa umístěny v příloze (viz Příloha). Význam jednotlivých parametrů uvedených v tabulkách je popsán v předcházející kapitole. Dále je zde vykreslena i směrová charakteristika odpovídajícího přijímače s vyznačeným přijímovým úhlem, což je úhel odečtený pro pokles výstupního napětí o 3 dB. Výstupní napětí je úměrné dopadajícímu optickému výkonu, proto je pokles o 3 dB představován poklesem napětí na 50 % výchozí hodnoty.

V tabulce č. 5 jsou zaznamenány naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro optický přijímač DET 10 A/M.

$\alpha [^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	10620	10180	10200	10410	10810	10444	100
5	103,2	93,8	99,7	114,3	83,7	98,94	0,947338
10	78,4	78,1	85,5	78,3	81,2	80,3	0,768863
15	27,2	25,4	31,2	29,3	33,7	29,36	0,281118
20	28,9	25,1	30,6	28,2	32,5	29,06	0,278246
25	23,7	24,8	30,7	28,3	31,2	27,74	0,265607
30	21,3	24,9	31,5	28,6	32,5	27,76	0,265799
35	23,5	23,6	29,3	27,1	33,3	27,36	0,261969
40	22,7	24,8	32,1	26,3	32,3	27,64	0,26465
45	23,1	23,6	29,2	26,5	31,6	26,8	0,256607
50	20,9	24,3	27,6	26,6	30,1	25,9	0,247989
55	22,9	25	26,1	26,1	28,2	25,66	0,245691
60	22,3	24,2	25,3	24,9	28,4	25,02	0,239563
65	21,5	24,2	27,1	24,7	26,6	24,82	0,237648
70	21,7	22,7	26,9	23,7	25,5	24,1	0,230755
75	21,2	22	26,3	23,5	24,2	23,44	0,224435
80	19,7	20,5	24,3	22,2	23,5	22,04	0,21103
85	19,1	20,2	21,6	20,1	21,5	20,5	0,196285
90	18,1	18,2	20,2	18,7	20,3	19,1	0,18288

Tabulka č. 5 : Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro DET 10 A/M

3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

V tabulce č. 6 jsou zaznamenány naměřené hodnoty pro optický přijímač DET 10 A/M a to proti směru hodinových ručiček.

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	10450	10590	10260	10590	10230	10424	100
5	172,3	175,6	141,5	164	158,4	162,36	1,557559
10	101,2	94,1	96,3	102,1	103,4	99,42	0,953761
15	45,7	45,8	46,9	48,2	50,6	47,44	0,455104
20	44,1	45,1	45,5	47,8	47,2	45,94	0,440714
25	42,1	41,3	41,2	45,5	44,6	42,94	0,411934
30	40,6	38,2	39,2	42,1	41,3	40,28	0,386416
35	35,5	35,2	36,4	39,2	44,9	38,24	0,366846
40	33,9	34,1	35,5	37,6	36,8	35,58	0,341328
45	33,7	34,2	32,6	34,9	35,1	34,1	0,32713
50	31,2	32,5	31,3	31,2	34,2	32,08	0,307751
55	30,1	31,5	30,3	31,6	32,9	31,28	0,300077
60	27,6	29,3	28,5	29,6	29,4	28,88	0,277053
65	26,4	28,1	27,2	27,6	28,3	27,52	0,264006
70	24,6	26,1	24,5	24,5	27,6	25,46	0,244244
75	23,5	24,3	23,1	23,8	25,5	24,04	0,230622
80	21,4	22	21,3	22,5	23,4	22,12	0,212203
85	20,1	19,7	19,3	20,2	21,3	20,12	0,193016
90	18,3	18,2	17,8	17,6	19,5	18,28	0,175365

Tabulka č. 6: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro DET 10 A/M

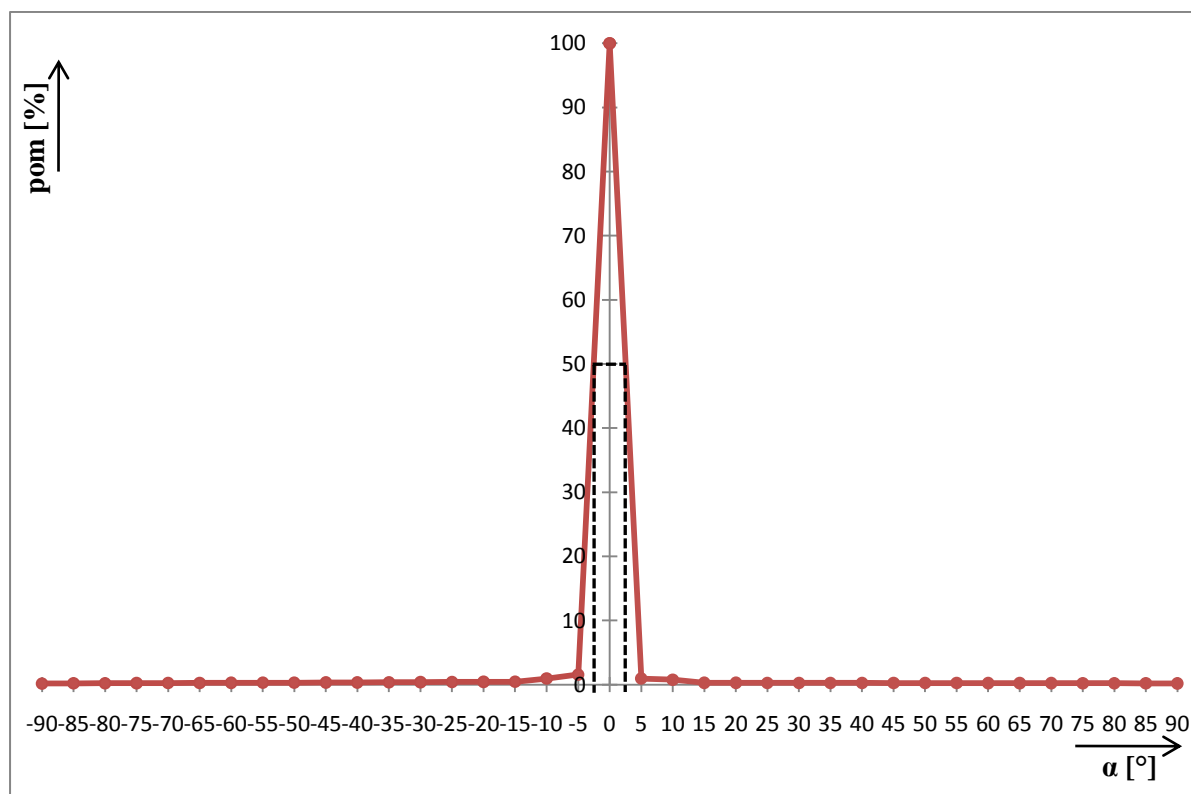
V tabulce č. 7 jsou vyneseny odečtené hodnoty příjmového úhlu pro oba směry jednotlivých optických přijímačů.

3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Typ přijímače	Velikost přijmového úhlu po směru hod. ručiček [°]	Velikost přijmového úhlu proti směru hod. ručiček [°]
DET 10 A/M	2,5	2,5
DET 10 A/M	2,5	3
DET 10 C/M	3	3
PDA 36A – EC (0dB)	12	11
PDA 36A – EC (10dB)	12	7,5
PDA 36A – EC (20dB)	13	7,5
PDA 36A – EC (30dB)	12,5	8
PDA 36A – EC (40dB)	12	10
PDA 36A – EC (50dB)	12	7,5
PDA 36A – EC (60dB)	12	7
PDA 36A – EC (70dB)	10	12

Tabulka č. 7: Odečtené hodnoty přijmového úhlu pro jednotlivé přijímače.

V grafu č. 1 je znázorněna požadovaná směrová charakteristika daného optického přijímače (DET 10 A/M).



Graf č. 1: Směrová charakteristika optického přijímače DET 10 A/M.

4 Závěr

V první části bakalářské práce je popsána základní teorie optických přijímačů. Podrobně jsou v ní popsány nejenom využívané typy detektorů, ale i způsoby detekce, používané materiály pro výrobu polovodičů využívaných v optických přijímačích a v neposlední řadě také základní vlastnosti přijímačů. Pro vypracování této kapitoly bylo čerpáno s různých literárních pramenů, které jsou vyznačeny v seznamu literatury a posléze v textu citovány.

V druhé kapitole, která je stěžejní částí celé práce je popsáno samotné experimentální měření na optickém přijímači. Naměřené výsledky jsou velice zajímavé, kdy na počátku měření jsem si nemyslel, že takových výsledků dosáhnu. Jeden z hlavních poznatků získaných v průběhu měření byla výrazná směrovost měřených optických přijímačů. Velmi výraznou směrovost projevovaly především přijímače typu DET 10 A/M; DET 10 C/M, kdy již při 5° natočení otočného stolu ztrácí detekční schopnost. Pro odpovídající úhel 5° klesá detekční schopnost pod jedno procento, z toho lze vyvodit, že při tak velkém poklesu je přijímač již prakticky nepoužitelný. Možné vysvětlení můžeme najít v parametru „aktivní oblast“, který se pro tyto typy přijímačů pochybuje kolem $0,8 \text{ mm}^2$. Při takto malé ploše aktivní oblasti i malé vychýlení způsobí nedostatek světla na vstupu přijímače, což má za následek malou absorpci fotonů (malý výstupní proud). Lepší parametry v tomto směru vykazoval optický přijímač typu PDA 36A – EC. U tohoto přijímače docházelo ke ztrátě detekce až při natočení o $10^\circ - 15^\circ$. Aktivní oblast uvedeného přijímače je 13 mm^2 , což je oproti předchozím typům markantní rozdíl. Z měření tedy jednoznačně vyplývá, že přijímače s větší aktivní oblastí jsou méně směrově závislé. Naměřené směrové charakteristiky bohužel není možné porovnat s údaji danými výrobcem, protože ten v katalogu tuto charakteristiku neuvádí.

Výsledné směrové charakteristiky jsou uvedeny v příloze, včetně tabulek s naměřenými hodnotami.

Literatura

- [1] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. *Základy fotoniky, 3. svazek*. Matfyzpress PRAHA 1995. ISBN 80-85863-00-6.
- [2] MARŠÁLEK, L. *Optická vlákna*. VŠB – TU 2006. Dostupný z WWW: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [3] BOHÁČ, L. *Výukové materiály – Optické komunikační systémy*. Dostupné z WWW: <http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4847>
- [4] *Photoelectric effect*. Wikipedia. Dostupný z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect
- [5] *Photodiode*. Wikipedia. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>
- [6] *Avalanche Photodiode*. Wikipedia. Dostupný z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Avalanche_photodiode
- [7] *Photo detector - DET10 A/M*. THORLABS. Datasheet. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.de/Thorcat/13000/13052-S01.pdf>
- [8] *Photo detector - DET10 C/M*. THORLABS. Datasheet. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.de/Thorcat/13100/13123-S01.pdf>
- [9] *Photo detector - PDA36A – EC*. THORLABS. Datasheet. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.de/Thorcat/13000/13053-S01.pdf>

Příloha

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	10070	9920	10420	10520	10730	10332	100
5	122,3	125	117,8	104,7	109,5	115,86	1,12137
10	105,8	98,4	99,5	87,1	87,6	95,68	0,926055
15	55,2	52,5	49,3	39,4	36,9	46,66	0,451607
20	55,8	45,8	44,8	38,2	37,2	44,36	0,429346
25	54,5	49,7	43,4	38,1	37,1	44,56	0,431281
30	53,1	47,6	43,8	37,3	37,8	43,92	0,425087
35	54,5	48,2	43,3	40,5	36,5	44,6	0,431669
40	53,2	47,1	42,3	38,4	37,4	43,68	0,422764
45	52,8	46,7	40,7	38,5	36,9	43,12	0,417344
50	49,9	46,1	38,9	37,6	35,5	41,6	0,402633
55	49,1	45,2	39,7	37,8	34,6	41,28	0,399535
60	47,6	43,9	37,4	36,1	40	41	0,396825
65	45,3	43,2	34,6	35,6	35,7	38,88	0,376307
70	45,2	44,2	35,9	34,8	34,3	38,88	0,376307
75	41,7	40	34	33,2	33,1	36,4	0,352304
80	38,2	36,7	31,9	32,2	32,1	34,22	0,331204
85	36,3	35,1	26,9	29,7	30,2	31,64	0,306233
90	32,4	32,8	25,2	28,6	28,5	29,5	0,285521

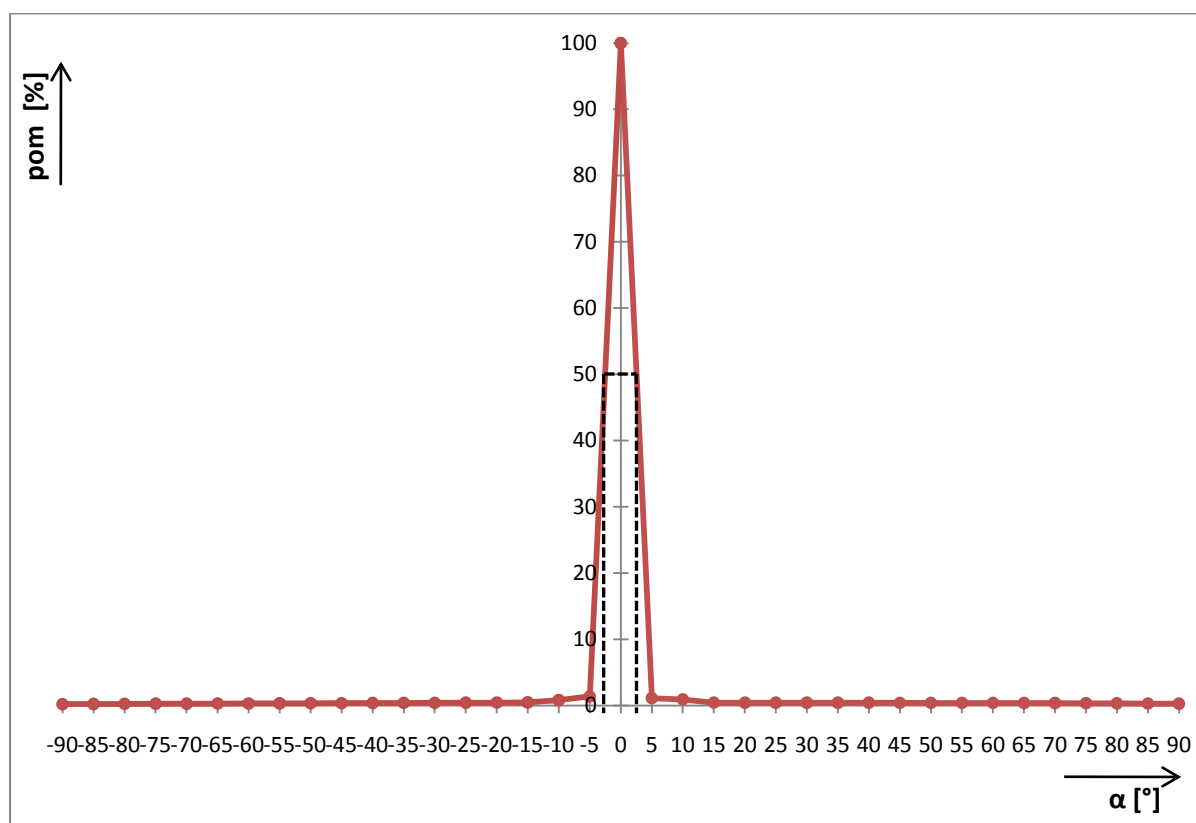
Tabulka č. 8: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro DET 10 A/M.

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	10910	10410	10690	10290	10010	10462	100
5	145,2	144,5	149,2	141,5	140,5	144,18	1,37813
10	83,5	82,6	91	85,7	85,8	85,72	0,819346
15	47,7	50,2	44,2	52,5	54,3	49,78	0,475817
20	44,3	45,2	49,4	49,8	47,6	47,26	0,45173
25	44,2	43,9	46,2	44,3	46,5	45,02	0,430319
30	43,9	42,2	43,1	44,5	44,8	43,7	0,417702
35	40,8	41,3	42,6	44,8	42,1	42,32	0,404512
40	38,2	39,4	39	39,9	41	39,5	0,377557
45	37,4	38,2	38,2	39,2	37,8	38,16	0,364749
50	35,7	35,9	36,5	37,7	36,3	36,42	0,348117
55	32,2	33	36,2	34,8	35,5	34,34	0,328236

PŘÍLOHA

60	33,6	32,6	34,8	33,3	34	33,66	0,321736
65	30,9	30,5	32	32,2	31,8	31,48	0,300898
70	29,5	30,2	31,3	31,5	30,8	30,66	0,293061
75	30,5	29,2	30,7	29,9	30,3	30,12	0,287899
80	26,4	24,5	26,7	26,7	28,4	26,54	0,25368
85	23,9	22,8	24,8	24,9	25,3	24,34	0,232652
90	22,8	21,4	24,2	22,9	21,8	22,62	0,216211

Tabulka č. 9: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro DET 10 A/M.



Graf č. 2: Směrová charakteristika optického přijímače DET 10 A/M.

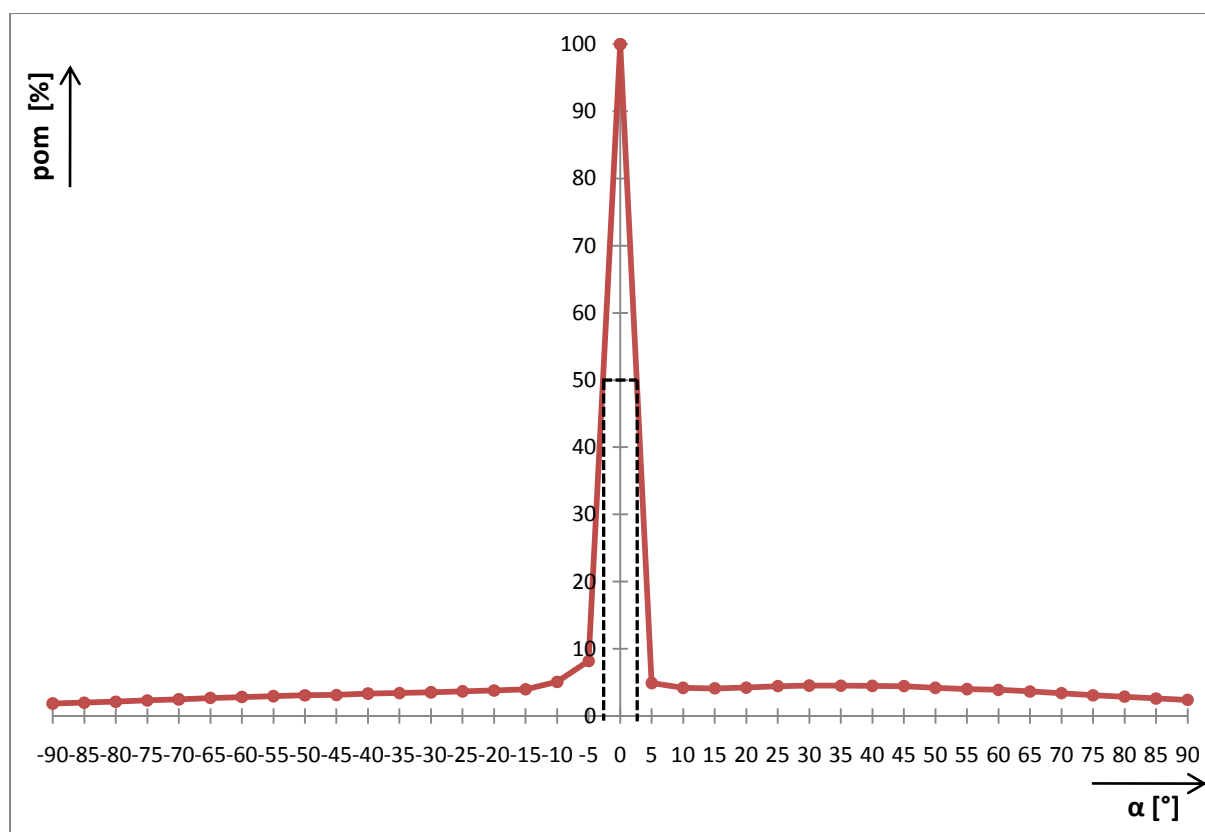
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	4950	5010	5070	5010	4990	5006	100
5	244	243	247	249	244	245,4	4,902117
10	210	209	215	211	202	209,4	4,18298
15	208	203	207	211	199,2	205,64	4,107871
20	211	214	211	215	203	210,8	4,210947
25	223	220	233	222	213	222,2	4,438674
30	225	225	239	225	215	225,8	4,510587
35	226	223	237	229	213	225,6	4,506592
40	225	220	239	219	216	223,8	4,470635
45	217	223	236	221	215	222,4	4,442669
50	211	189,2	232	211	205	209,64	4,187775
55	205	173,7	217	202	202	199,94	3,994007
60	200	163,8	215	197,1	194,1	194	3,87535
65	186,7	160,1	196,3	188,3	181	182,48	3,645226
70	173,4	179,6	153,1	178,4	165,1	169,92	3,394327
75	165,5	144,6	142,8	167,8	148,5	153,84	3,073112
80	150,6	137,2	142,2	154,3	132,7	143,4	2,864563
85	137,6	129,1	129,3	135,5	119,7	130,24	2,601678
90	125,2	126,4	120,4	116,9	108,7	119,52	2,387535

Tabulka č. 10: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro DET 10 C/M.

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	4980	4940	5010	4960	4950	4968	100
5	426	390	343	481	389	405,8	8,168277
10	250	218	202	344	246	252	5,072464
15	219	198	148	204	213	196,4	3,953301
20	206	177	162	191	205	188,2	3,788245
25	199,2	172	156	186,2	195,1	181,7	3,657407
30	192,2	169	153	176,6	184,2	175	3,522544
35	183,6	164	150	168,7	178,5	168,96	3,400966
40	190,8	167	142	156,8	168,4	165	3,321256
45	170,1	159	140	146,9	160,1	155,22	3,124396
50	164,4	155	137,2	148,6	159,4	152,92	3,0781
55	159,6	152	133,5	136,3	151,2	146,52	2,949275
60	155,2	145	126,7	129,3	144,8	140,2	2,822061
65	149,6	137	122,5	122,1	132,9	132,82	2,67351

70	135	126	112,8	113,2	124,9	122,38	2,463366
75	127,1	117	104,6	106	117,4	114,42	2,30314
80	113	109	97,3	100,9	106,8	105,4	2,121578
85	103,2	101	91,8	94,9	100,4	98,26	1,977858
90	95,2	95,1	85,9	91,5	92,7	92,08	1,853462

Tabulka č. 11: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro DET 10 C/M.



Graf č. 3: Směrová charakteristika optického přijímače DET 10 C/M.

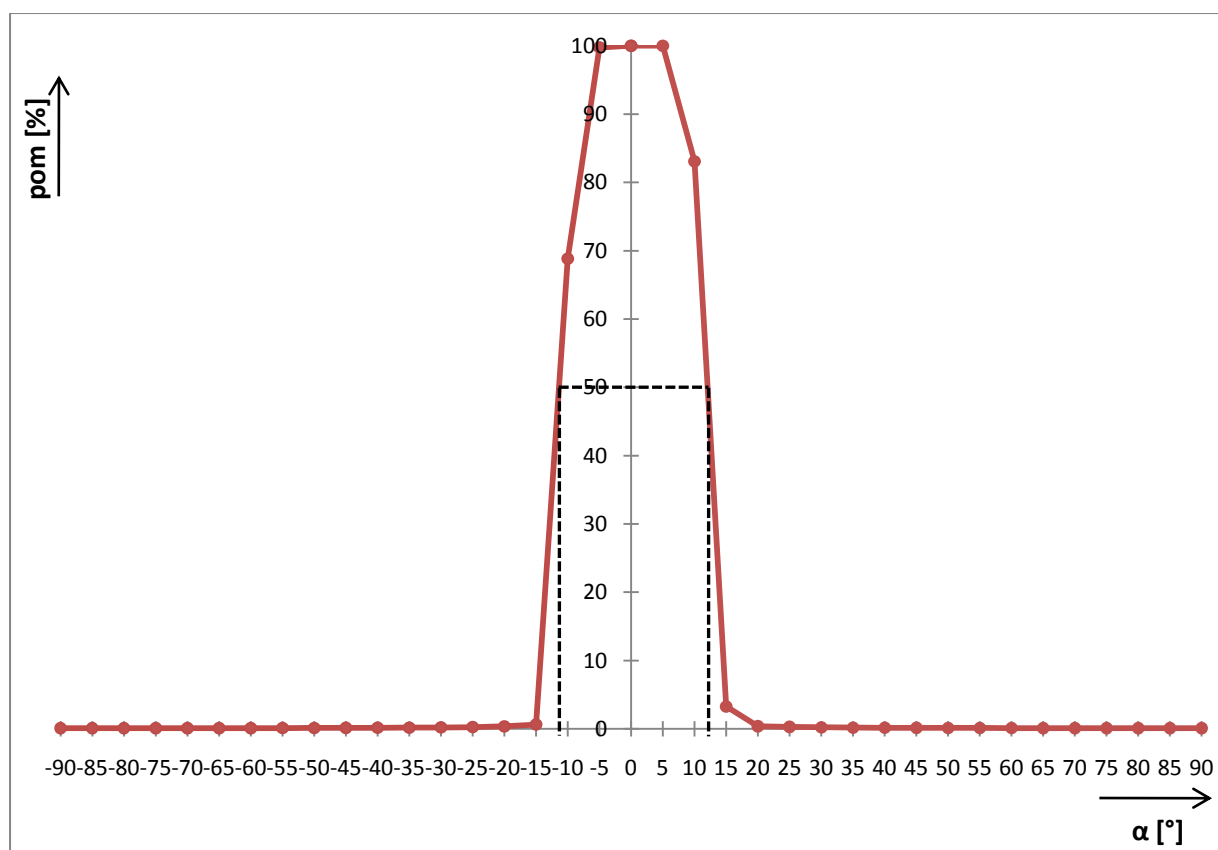
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5040	5040	5050	5010	5000	5028	100
5	5170	5140	5110	5100	5090	5122	100
10	5020	5070	5070	3230	2500	4178	83,09467
15	268	103	163	146,3	144,2	164,9	3,279634
20	19,4	19,5	19,7	19,5	19,4	19,5	0,387828
25	14,1	16,6	14,1	14,4	15	14,84	0,295147
30	11,2	11,4	13,8	10,9	10,9	11,64	0,231504
35	9,3	9,3	9,4	9,3	9,3	9,32	0,185362
40	8,3	8,4	8,4	8,4	8,4	8,38	0,166667
45	7,5	7,6	7,6	7,6	7,5	7,56	0,150358
50	6,9	6,9	7	7	6,9	6,94	0,138027
55	6,4	6,5	6,5	6,5	6,5	6,48	0,128878
60	5,9	5,9	6	6	6	5,96	0,118536
65	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,36	0,106603
70	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,36	0,106603
75	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,36	0,106603
80	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,36	0,106603
85	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,36	0,106603
90	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,36	0,106603

Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (0dB)

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5000	5090	4950	4960	4970	4994	100
5	4960	5130	4880	4950	4990	4982	99,75971
10	3580	2490	4790	3830	2500	3438	68,84261
15	32,1	33,9	33,3	30	29,5	31,76	0,635963
20	19	19,9	18,6	17,9	18,1	18,7	0,374449
25	13,5	13,9	13,3	12,7	12,5	13,18	0,263917
30	10,5	10,6	10,3	10,1	10,1	10,32	0,206648
35	8,9	9	9,9	8,7	8,6	9,02	0,180617
40	7,9	8	7,9	7,7	7,7	7,84	0,156988
45	7,1	7,2	7,2	7	7	7,1	0,142171
50	6,5	6,6	6,6	6,4	6,5	6,52	0,130557
55	6	6,1	6,2	5,8	5,8	5,98	0,119744
60	5,3	5,4	5,6	5,4	5,4	5,42	0,10853
65	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,28	0,105727

70	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,28	0,105727
75	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,28	0,105727
80	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,28	0,105727
85	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,28	0,105727
90	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,28	0,105727

Tabulka č. 13: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (0dB).



Graf č. 4: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 0 dB.

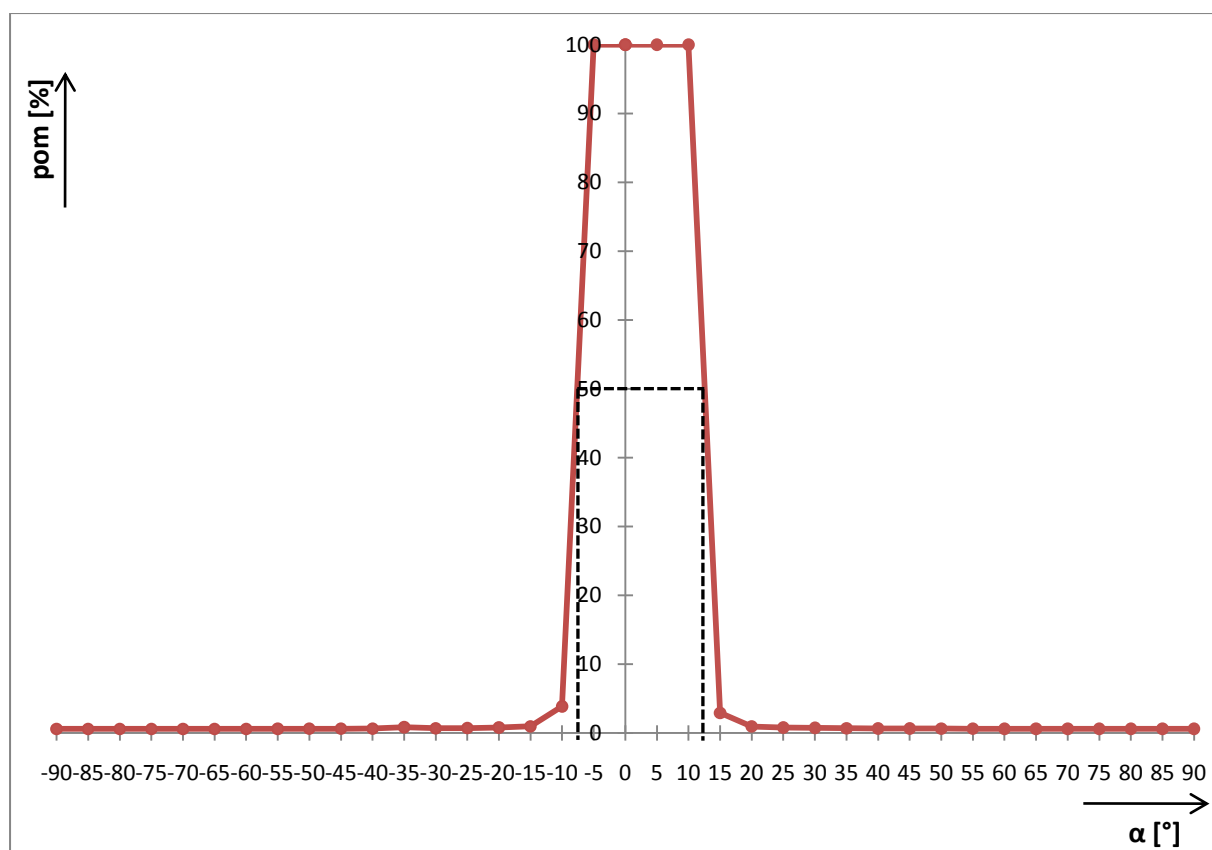
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1600	1600	1590	1600	1590	1596	100
5	1600	1600	1600	1600	1600	1600	100
10	1600	1590	1600	1600	1600	1598	100
15	42,8	42,6	45,2	46,7	55,2	46,5	2,913534
20	15,1	15	15,2	15,1	15,4	15,16	0,949875
25	12,6	12,6	12,7	12,8	12,8	12,7	0,795739
30	12,3	12,2	11,8	11,7	11,7	11,94	0,74812
35	10,8	10,8	10,9	10,9	10,9	10,86	0,680451
40	10,4	10,4	10,5	10,5	10,5	10,46	0,655388
45	10,2	10,2	10,2	10,3	10,3	10,24	0,641604
50	10	10	10	10,1	10,1	10,04	0,629073
55	9,9	9,9	9,8	9,9	9,9	9,88	0,619048
60	9,6	9,6	9,6	9,7	9,7	9,64	0,60401
65	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,54	0,597744
70	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,54	0,597744
75	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,54	0,597744
80	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,54	0,597744
85	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,54	0,597744
90	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,54	0,597744

Tabulka č. 14: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (10dB).

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1580	1590	1600	1600	1590	1592	100
5	1590	1590	1590	1600	1590	1592	100
10	48,5	56,1	51,8	70,9	79,9	61,44	3,859296
15	15,4	15,1	15,2	15,3	15,4	15,28	0,959799
20	12,7	12,6	12,7	12,7	12,7	12,68	0,796482
25	11,4	11,4	11,4	11,5	11,4	11,42	0,717337
30	10,7	10,7	10,7	10,8	10,8	10,74	0,674623
35	13,2	15,8	11,5	11,4	14,7	13,32	0,836683
40	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	0,634422
45	9,9	9,9	9,9	10	10	9,94	0,624372
50	9,7	9,8	9,8	9,8	9,8	9,78	0,614322
55	9,6	9,6	9,7	9,7	9,7	9,66	0,606784
60	9,4	9,4	9,5	9,5	9,5	9,46	0,594221
65	9,4	9,4	9,5	9,5	9,5	9,46	0,594221

70	9,4	9,4	9,5	9,5	9,5	9,46	0,594221
75	9,4	9,4	9,5	9,5	9,5	9,46	0,594221
80	9,4	9,4	9,5	9,5	9,5	9,46	0,594221
85	9,4	9,4	9,4	9,5	9,5	9,44	0,592965
90	9,4	9,4	9,4	9,5	9,5	9,44	0,592965

Tabulka č. 15: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (10dB).



Graf č. 5: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 10 dB.

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5060	5030	5020	5010	4990	5022	100
5	5060	5040	5020	5000	5000	5024	100
10	5070	5030	5040	5030	5010	5036	100
15	118,3	145,6	145,6	685,2	218	262,54	5,227798
20	27,6	28	28,1	29,2	30	28,58	0,569096
25	20	20,3	20	20,4	21,3	20,4	0,406213
30	18,1	17,8	16,7	16,7	17,1	17,28	0,344086
35	14,3	14,2	14,2	14,4	14,7	14,36	0,285942
40	13,1	13	13	13,1	13,3	13,1	0,260852
45	12,2	12,2	12,2	12,2	12,4	12,24	0,243728
50	11,6	11,6	11,6	11,6	11,7	11,62	0,231382
55	11,2	11,1	11,1	11,2	11,2	11,16	0,222222
60	10,4	10,3	10,4	10,4	10,4	10,38	0,206691
65	10	10	10	10	10,1	10,02	0,199522
70	10	10	10	10	10,1	10,02	0,199522
75	10	10	10	10	10,1	10,02	0,199522
80	10	10	10	10	10	10	0,199124
85	10	10	10	10	10	10	0,199124
90	10	10	10	10	10	10	0,199124

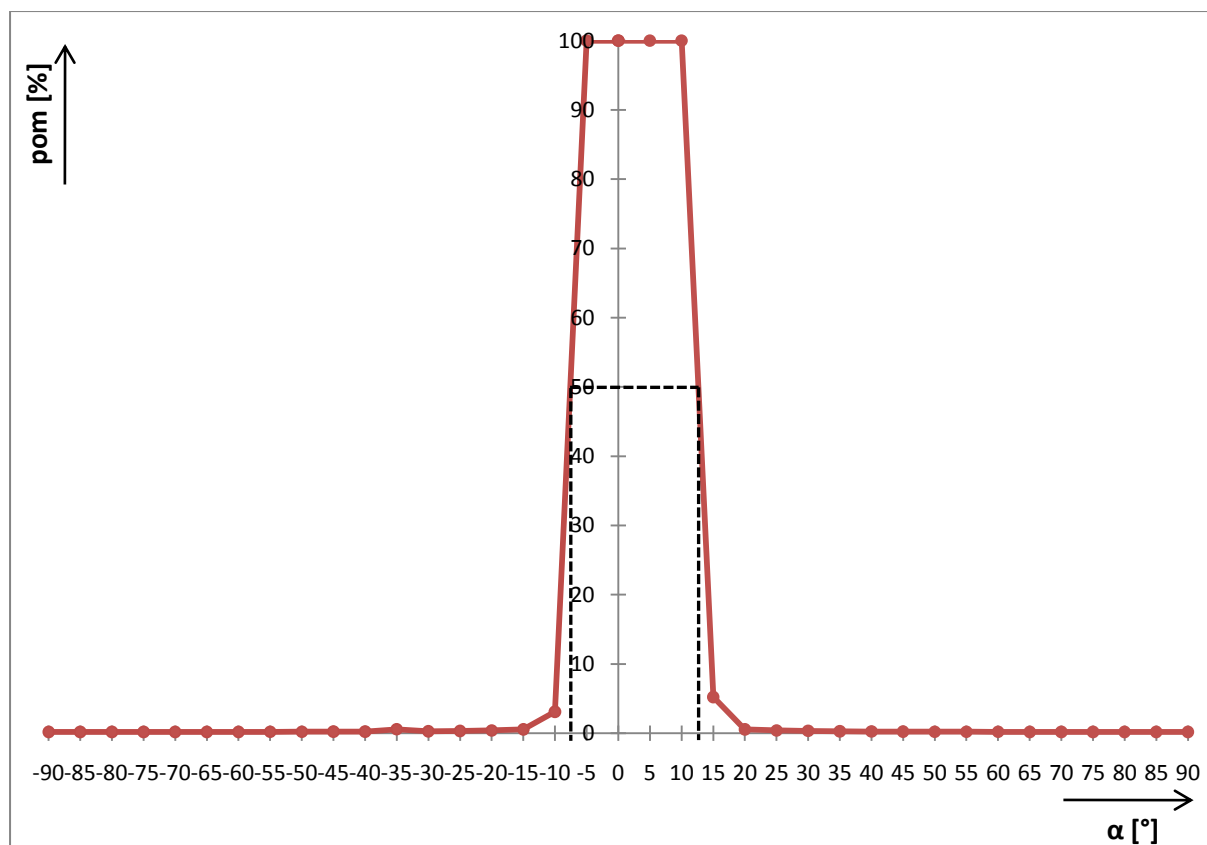
Tabulka č. 16: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (20dB).

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5010	5050	5080	5030	5050	5044	100
5	5020	5050	5080	5040	5050	5048	100
10	137,8	140,1	180,2	171,2	152,1	156,28	3,098335
15	27,5	27,6	29,3	28,8	29,1	28,46	0,564235
20	19,8	20,1	20,7	20,8	20,9	20,46	0,40563
25	16,1	16,2	17,1	16,9	16,9	16,64	0,329897
30	13,9	14	14,8	14,7	14,7	14,42	0,285884
35	25,8	35,1	36,7	22	25,7	29,06	0,57613
40	11,9	12	12,5	12,5	12,6	12,3	0,243854
45	11,4	11,5	11,8	11,9	11,9	11,7	0,231959
50	10,9	11	11,3	11,3	11,3	11,16	0,221253
55	10,6	10,7	10,9	10,9	10,9	10,8	0,214116
60	10	10	10,1	10,1	10,1	10,06	0,199445
65	9,9	9,9	10	10	10	9,96	0,197462

PŘÍLOHA

70	9,9	9,9	10	10	10	9,96	0,197462
75	9,9	9,9	10	10	10	9,96	0,197462
80	9,9	9,9	10	10	10	9,96	0,197462
85	9,9	9,9	10	10	10	9,96	0,197462
90	9,9	9,9	10	10	10	9,96	0,197462

Tabulka č. 17: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (20dB).



Graf č. 6: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 20 dB.

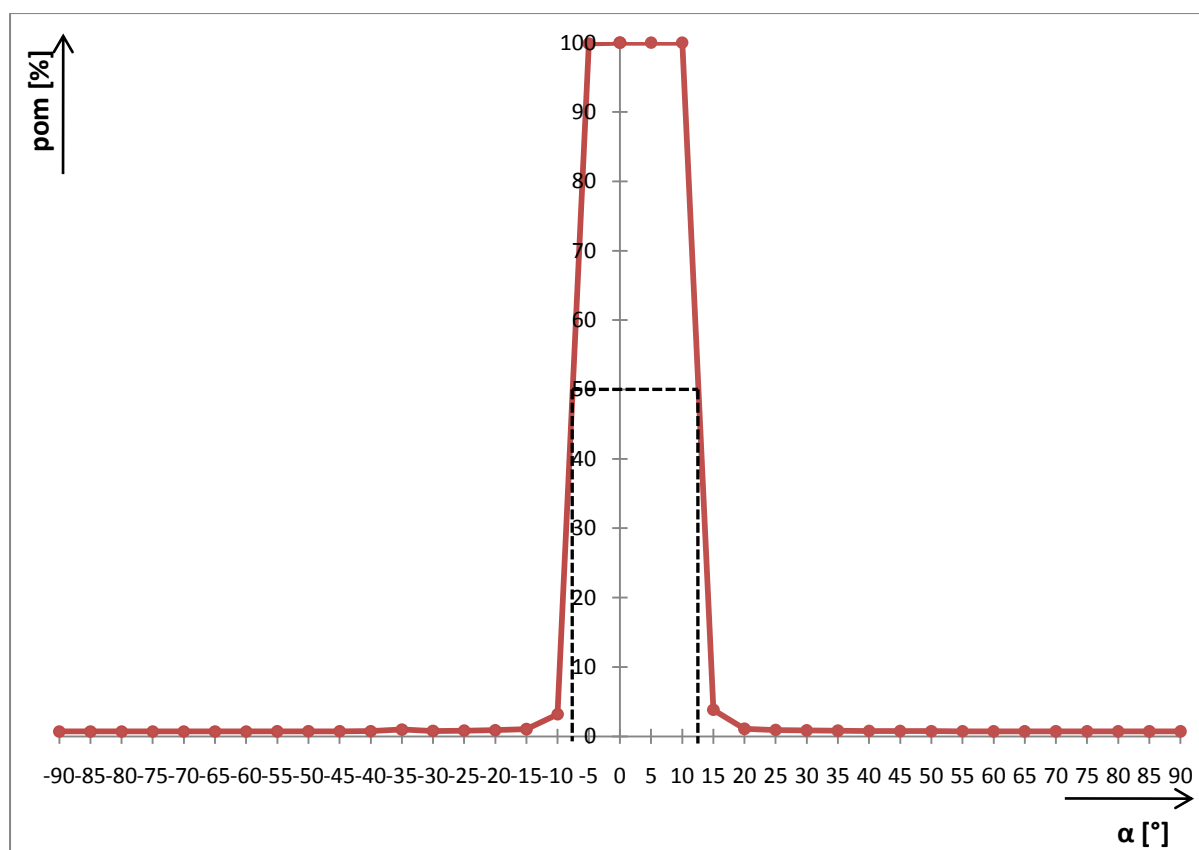
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1630	1610	1620	1610	1620	1618	100
5	1630	1610	1630	1610	1620	1620	100
10	1630	1620	1630	1620	1620	1624	100
15	49,3	54,6	70,3	69,5	65,6	61,86	3,823239
20	17,1	17,3	17,7	17,6	17,7	17,48	1,080346
25	14,7	14,7	15	15	14,9	14,86	0,918418
30	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	0,846724
35	12,9	12,9	13	13	13	12,96	0,800989
40	12,5	12,5	12,6	12,6	12,6	12,56	0,776267
45	12,2	12,2	12,3	12,3	12,3	12,26	0,757726
50	12	12	12,1	12,1	12,1	12,06	0,745365
55	11,9	11,9	11,9	11,9	12	11,92	0,736712
60	11,6	11,6	11,7	11,7	11,7	11,66	0,720643
65	11,5	11,5	11,6	11,6	11,5	11,54	0,713226
70	11,5	11,5	11,6	11,6	11,5	11,54	0,713226
75	11,5	11,5	11,6	11,6	11,5	11,54	0,713226
80	11,5	11,6	11,6	11,6	11,5	11,56	0,714462
85	11,5	11,6	11,6	11,6	11,5	11,56	0,714462
90	11,5	11,6	11,6	11,6	11,5	11,56	0,714462

Tabulka č. 18: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (30dB).

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1630	1630	1640	1630	1630	1632	100
5	1620	1630	1640	1630	1630	1630	99,87745
10	53,3	51,7	51,7	51,5	51,2	51,88	3,178922
15	16,7	16,9	17,1	17	17	16,94	1,03799
20	14,4	14,5	14,6	14,6	14,6	14,54	0,890931
25	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	0,827206
30	12,7	12,7	12,8	12,8	12,8	12,76	0,781863
35	12,6	15,1	17,5	15,2	19,8	16,04	0,982843
40	12,1	12,1	12,2	12,2	12,2	12,16	0,745098
45	11,9	12	11,9	12	12	11,96	0,732843
50	11,8	11,8	11,8	11,9	11,9	11,84	0,72549
55	11,7	11,7	11,7	11,7	11,8	11,72	0,718137
60	11,5	11,5	11,5	11,5	11,6	11,52	0,705882
65	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,704657

70	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,704657
75	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,704657
80	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,704657
85	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,704657
90	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,704657

Tabulka č. 19: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (30dB).



Graf č. 7: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 30 dB.

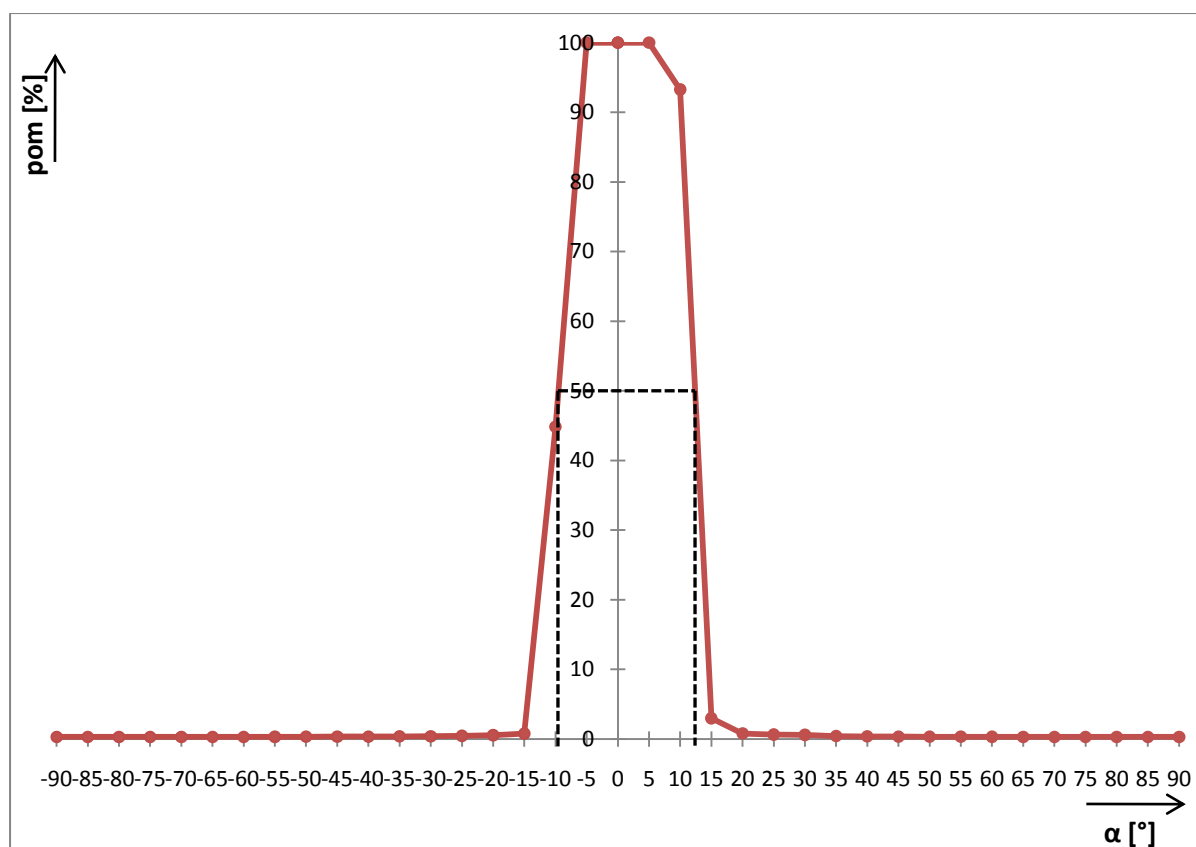
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5280	5270	5290	5290	5280	5282	100
5	5280	5270	5290	5290	5280	5282	100
10	4760	4930	5110	4870	4960	4926	93,26013
15	158,1	158,3	161,2	161	147,3	157,18	2,975767
20	45,7	45,4	43,2	43,2	31,2	41,74	0,790231
25	38,2	39,1	32,3	31,9	25	33,3	0,630443
30	35,3	36,1	27,8	29,8	25,1	30,82	0,583491
35	24,9	25,1	21,1	20,9	20,2	22,44	0,424839
40	20,6	20,6	19,1	19,1	19	19,68	0,372586
45	18,6	18,6	18,3	18,3	18,2	18,4	0,348353
50	17,7	17,7	17,7	17,7	17,6	17,68	0,334722
55	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	0,325634
60	16,3	16,4	16,5	16,4	16,5	16,42	0,310867
65	16,1	16,1	16,2	16,1	16,2	16,14	0,305566
70	16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	16,12	0,305187
75	16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	16,12	0,305187
80	16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	16,12	0,305187
85	16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	16,12	0,305187
90	16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	16,12	0,305187

Tabulka č. 20: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (40dB).

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5290	5320	5250	5320	5310	5298	100
5	5310	5330	5280	5330	5320	5314	100
10	1250	2500	2800	2900	2430	2376	44,84711
15	38,6	39,1	42,7	41,6	41,1	40,62	0,766704
20	28,2	28,7	31	29,1	29,2	29,24	0,551906
25	23,1	23,5	24,3	23,7	23,8	23,68	0,446961
30	20,7	20,8	21,3	21	21,1	20,98	0,395998
35	19,4	19,5	19,8	19,6	19,6	19,58	0,369573
40	18,4	18,5	18,8	18,6	18,6	18,58	0,350698
45	17,8	17,8	18,1	17,9	17,9	17,9	0,337863
50	17,2	17,3	17,5	17,4	17,4	17,36	0,327671
55	16,9	16,9	17	17	17	16,96	0,320121
60	16,2	16,2	16,2	16,1	16,2	16,18	0,305398
65	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	0,303888

70	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	0,303888
75	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	0,303888
80	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	0,303888
85	16	16,1	16,1	16,1	16	16,06	0,303133
90	16	16	16,1	16,1	16	16,04	0,302756

Tabulka č. 21: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (40dB).



Graf č. 8: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 40 dB.

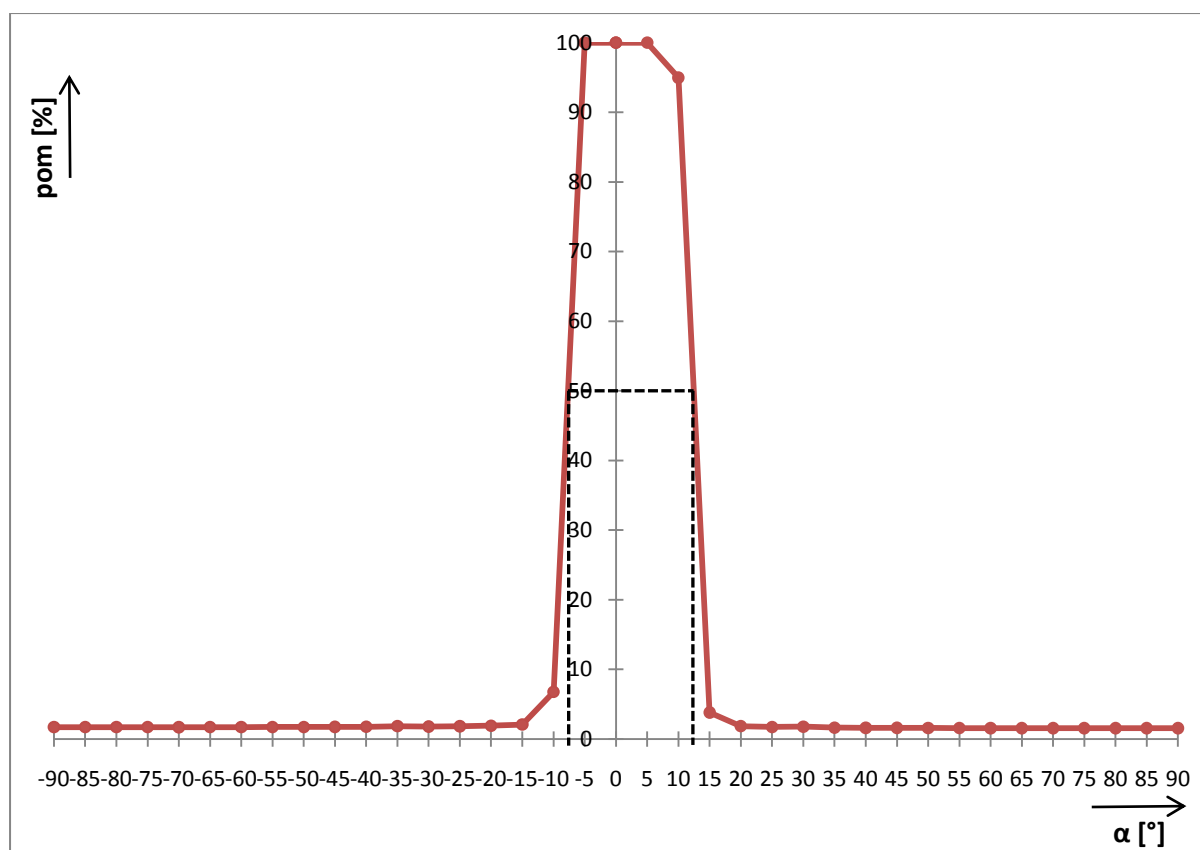
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1730	1750	1760	1760	1730	1746	100
5	1740	1760	1770	1770	1740	1756	100
10	1460	1640	1730	1750	1710	1658	94,95991
15	62,2	68,5	68,4	65,1	68,5	66,54	3,810997
20	31,3	31,6	32,3	32,8	33	32,2	1,844215
25	29,4	29,7	30,3	30,6	30,7	30,14	1,726231
30	29,1	30,7	31,4	31,6	31,6	30,88	1,768614
35	28,6	28,1	28,5	28,8	29	28,6	1,63803
40	27,6	27,7	28,1	28,4	28,6	28,08	1,608247
45	27,4	27,5	27,8	28,2	28,4	27,86	1,595647
50	27,3	27,3	27,7	28	28,2	27,7	1,586483
55	27,2	27,2	27,5	27,8	28,1	27,56	1,578465
60	26,8	26,9	27,3	27,6	27,8	27,28	1,562428
65	26,8	26,8	27,1	27,4	27,7	27,16	1,555556
70	26,7	26,8	27,2	27,3	27,7	27,14	1,55441
75	26,8	26,9	27,1	27,3	27,7	27,16	1,555556
80	26,7	26,9	27,1	27,3	27,7	27,14	1,55441
85	26,7	26,9	27,1	27,3	27,7	27,14	1,55441
90	26,7	26,9	27,1	27,3	27,7	27,14	1,55441

Tabulka č. 22: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (50dB).

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1760	1750	1760	1760	1760	1758	100
5	1760	1750	1760	1760	1760	1758	100
10	139,1	109,4	96,7	136,2	113,2	118,92	6,764505
15	36,3	36,2	36,3	36,8	36,6	36,44	2,07281
20	33,5	33,4	33,5	33,8	33,8	33,6	1,911263
25	32,1	32,1	32,2	32,3	32,3	32,2	1,831627
30	31,4	31,3	31,4	31,6	31,6	31,46	1,789534
35	32,3	33,9	32,3	31,9	31,3	32,34	1,83959
40	30,7	30,6	30,7	30,9	30,9	30,76	1,749716
45	30,4	30,4	30,5	30,6	30,7	30,52	1,736064
50	30,3	30,2	30,4	30,4	30,5	30,36	1,726962
55	30,3	30,1	30,2	30,3	30,9	30,36	1,726962
60	30	29,9	30	30,1	30,1	30,02	1,707622
65	29,9	29,9	30	29,9	30,1	29,96	1,704209

70	30	29,7	30	29,9	29,9	29,9	1,700796
75	29,9	29,9	30	29,9	30	29,94	1,703072
80	29,9	29,9	30	30	30	29,96	1,704209
85	29,9	29,9	29,9	30	30	29,94	1,703072
90	29,9	29,9	29,9	30	30	29,94	1,703072

Tabulka č. 23: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (50dB).



Graf č. 9: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 50 dB.

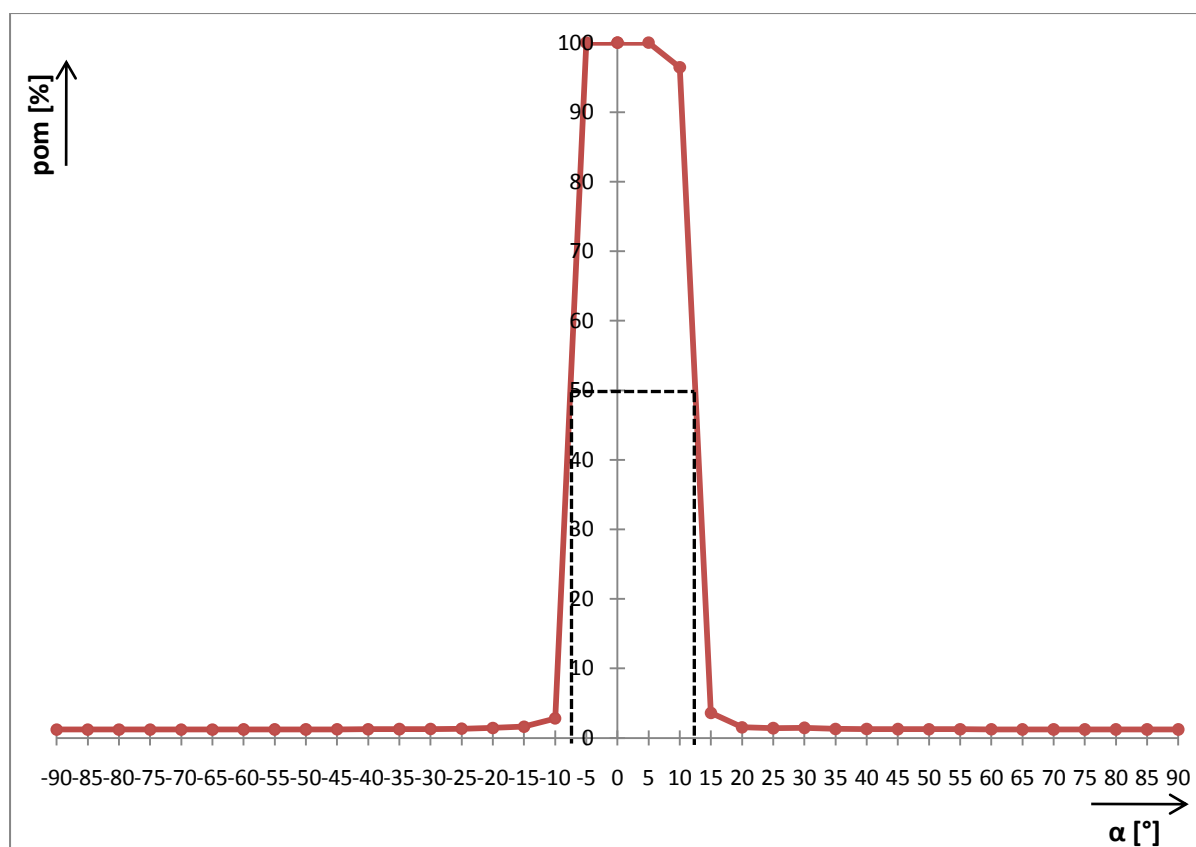
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5370	5350	5450	5420	5480	5414	100
5	5380	5360	5470	5440	5490	5428	100
10	5060	5170	5290	5300	5290	5222	96,45364
15	196,4	192,1	193,8	195,4	196,4	194,82	3,598448
20	82,6	81,8	82,4	82,6	83,1	82,5	1,523827
25	76	74,9	75,6	75,8	76,2	75,7	1,398227
30	78,2	78,5	77,6	79,5	80,3	78,82	1,455855
35	70,4	70,1	70,7	70,8	71,2	70,64	1,304765
40	68,7	68,9	69,2	69,7	70	69,3	1,280015
45	67,9	68	68,7	68,7	69,5	68,56	1,266347
50	67,2	67,6	67,9	68,5	68,7	67,98	1,255634
55	66,7	67,2	67,6	67,8	68,1	67,48	1,246398
60	65,9	66,4	66,7	66,7	67,3	66,6	1,230144
65	65,5	66,2	66,3	66,5	66,9	66,28	1,224233
70	65,6	66,2	66,2	66,5	66,9	66,28	1,224233
75	65,6	66,1	66,2	66,6	66,9	66,28	1,224233
80	65,6	66	66,2	66,7	66,9	66,28	1,224233
85	65,6	65,9	66,2	66,7	66,9	66,26	1,223864
90	65,6	66	66,2	66,7	66,9	66,28	1,224233

Tabulka č. 24: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (60dB).

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	5430	5450	5360	5480	5370	5418	100
5	5450	5480	5380	5490	5420	5444	100
10	754	1,75	1,19	1,14	1,98	152,012	2,805685
15	86,2	88,7	88,7	88,3	88,3	88,04	1,624954
20	76,6	77,7	77,5	77,8	77,9	77,5	1,430417
25	71,6	72,3	72,4	72,6	72,8	72,34	1,335179
30	69,1	69,4	70,2	70,1	70,5	69,86	1,289406
35	68,2	68,1	68,6	68,7	69,1	68,54	1,265042
40	66,9	67,3	67,7	67,8	68,2	67,58	1,247324
45	66,4	66,9	66,9	67,2	67,4	66,96	1,23588
50	65,6	66,3	66,5	66,7	66,8	66,38	1,225175
55	65,4	65,7	66,1	66,4	66,7	66,06	1,219269
60	69,6	64,8	65,1	65,6	65,8	66,18	1,221484
65	64,6	64,8	65	65,6	65,6	65,12	1,20192

70	64,3	65,1	65,1	65,5	65,7	65,14	1,202289
75	64,1	65,1	65,1	65,4	65,5	65,04	1,200443
80	64,2	65,1	65,1	65,4	65,5	65,06	1,200812
85	64,1	65	65,1	65,4	65,4	65	1,199705
90	64,1	65	65,1	65,4	65,4	65	1,199705

Tabulka č. 25: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (60dB).



Graf č. 10: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 60 dB.

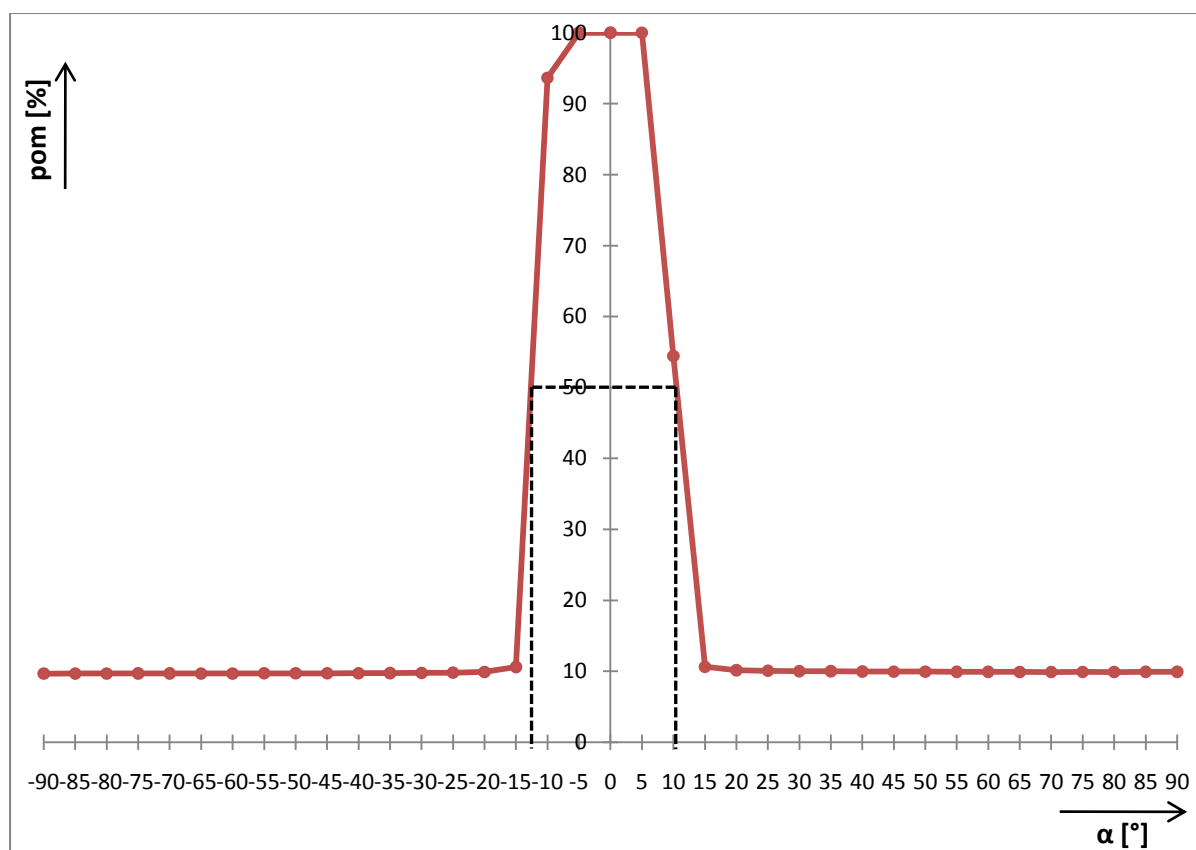
$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1950	1970	1960	1990	1970	1968	100
5	1960	1970	1970	2010	1980	1978	100
10	1040	1170	920	846	1380	1071,2	54,43089
15	208	203	207	209	219	209,2	10,63008
20	197,2	199,7	199,6	200	202	199,7	10,14736
25	196,3	196,5	198,7	199,8	200	198,26	10,07419
30	194,7	196,1	196,1	198,4	200	197,06	10,01321
35	194,6	195,9	196,3	198,1	199,5	196,88	10,00407
40	193,7	195,1	195,7	197	199,2	196,14	9,966463
45	193,1	194,5	195,5	197,4	198,5	195,8	9,949187
50	193,4	194,3	196,1	196,7	198,4	195,78	9,948171
55	192,7	193,7	195,4	196	198,1	195,18	9,917683
60	192,9	193,9	195,3	195,7	197,7	195,1	9,913618
65	192,2	193,5	194,7	196,1	198,1	194,92	9,904472
70	191,3	193,2	195,3	195,9	197,7	194,68	9,892276
75	191,8	193,7	195,1	195,7	197,6	194,78	9,897358
80	191,2	194,2	195	195,7	197,3	194,68	9,892276
85	192,4	194,5	195,3	195,8	197,8	195,16	9,916667
90	192,5	193,6	194,6	196,5	198,2	195,08	9,912602

Tabulka č. 26: Naměřené hodnoty po směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (70dB).

$\alpha[^\circ]$	U_{21} [mV]	U_{22} [mV]	U_{23} [mV]	U_{24} [mV]	U_{25} [mV]	U_2 [mV]	pom [%]
0	1930	1980	1930	1960	1980	1956	100
5	1940	1990	1940	1970	1980	1964	100
10	1810	1870	1840	1810	1830	1832	93,66053
15	201	205	211	210	209	207,2	10,59305
20	189,6	193,2	194,3	195,2	195,9	193,64	9,899796
25	187,5	190,7	192,7	194	193,8	191,74	9,802658
30	187,1	190,4	191,6	193,5	193,2	191,16	9,773006
35	187,7	189,7	190,3	192,4	192,7	190,56	9,742331
40	186,1	189,4	190,2	192,2	192,2	190,02	9,714724
45	186	189,3	190,1	191,8	192	189,84	9,705521
50	186,5	189,2	189,8	191,4	192,3	189,84	9,705521
55	186,8	188,7	189,5	191,7	191,9	189,72	9,699387
60	186,3	188,2	189,7	191	191,2	189,28	9,676892
65	186,1	188,8	189,2	190,7	191,5	189,26	9,675869

70	186,3	188,9	189,7	191,2	191,5	189,52	9,689162
75	186,2	188,9	189,5	191,5	191,6	189,54	9,690184
80	186,3	188,7	188,9	191,7	191,4	189,4	9,683027
85	186,4	188,2	188,6	191,2	191,3	189,14	9,669734
90	186,5	188,5	188,7	190,4	191,2	189,06	9,665644

Tabulka č. 27: Naměřené hodnoty proti směru hodinových ručiček pro PDA 36A – EC (70dB).



Graf č. 11: Směrová charakteristika optického přijímače PDA 36A – EC pro zesílení 70 dB.